

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAQUEL NAIARA FERNANDES SILVA

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO,
TÉCNICA *LEAP-FROG*, NA DETERMINAÇÃO DE RECALQUE EM
GRANDES ESTRUTURAS: ESTUDO DE CASO PARA A UHE MAUÁ**

**CURITIBA
2012**

RAQUEL NAIARA FERNANDES SILVA

AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO,
TÉCNICA *LEAP-FROG*, NA DETERMINAÇÃO DE RECALQUE EM
GRANDES ESTRUTURAS: ESTUDO DE CASO PARA A UHE MAUÁ

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Área de Concentração em Geodésia, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luis Faggion

CURITIBA
2012

Silva, Raquel Naiara Fernandes

Avaliação do método de nivelamento trigonométrico, técnica *Leap-Frog*, na determinação de recalque em grandes estruturas: estudo de caso para a UHE Mauá / Raquel Naiara Fernandes Silva. – Curitiba, 2012.

119 f. : il., tab, graf.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Pedro Luis Faggion

1. Redes (Geodésia). 2. Referência de nível. 3. Nivelamento. 4. I. Faggion, Pedro Luis. II. Título.

CDD 526.36


TERMO DE APROVAÇÃO

RAQUEL NAIARA FERNANDES SILVA

*"AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO, TÉCNICA
LEAP-FROG, NA DETERMINAÇÃO DE RECALQUE EM GRANDES
ESTRUTURAS: ESTUDO DE CASO PARA A UHE MAUÁ"*

Dissertação nº 255 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

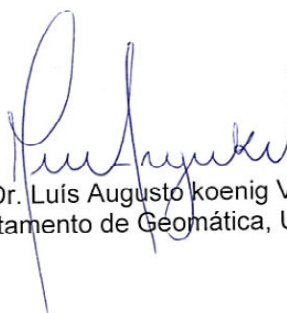
Orientador:



Prof. Dr. Pedro Luis Paggion
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Dalto Domingos Rodrigues
Universidade Federal de Viçosa, UFV



Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 30 de julho de 2012.

Aos meus pais, José Geraldo e Ângela.

Aos meus irmãos Romênia e Ricardo.

À minha cunhada, Patrícia.

AGRADECIMENTOS

À Santíssima Trindade e ao meu anjo da guarda por me guiar nessa trajetória que no início me pareceu tão intimidante, por me fortalecer nas horas do desânimo, da solidão, do medo, por me abençoar e me manter serena para encarar todos os problemas e enfrentá-los de cabeça erguida e assim concluir mais essa etapa importante da minha vida.

Aos meus pais José Geraldo e Ângela pelo amor incondicional, pelas palavras de incentivo nas horas do desespero, pelos conselhos e pelas orações que sem dúvida me tornou mais forte a cada dia.

Ao meu irmão Ricardo e minha cunhada Patrícia pela torcida fiel pelo meu sucesso profissional.

À minha irmã Romênia, por me ouvir nas horas que a tristeza batia em minha porta e me aconselhar da melhor forma possível.

À família Guerreiro que me acolheu como filha, me apoiou em todas as minhas decisões e pela torcida em prol do meu sucesso.

Aos meus familiares pela torcida pelo sucesso dessa etapa. Em especial às minhas avós, Eva e Hilda, pelas orações.

À UFV, pela maturidade profissional me concedida e em especial ao Professor Doutor Dalto Domingos Rodrigues pelo incentivo de seguir a pesquisa em outra instituição e pela participação na banca de qualificação, pelas valiosas sugestões para o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas pela oportunidade cedida.

Ao LAIG I e II e LABTOPO pelos empréstimos dos equipamentos necessários.

À Mônica, por sempre ajudar e pelas boas risadas na secretaria.

À Bibliotecária Vilma Machado pelo auxílio na normatização do presente trabalho.

À CAPES por proporcionar a bolsa de estudos durante os dois anos de pesquisa.

À COPEL, que através do engenheiro Marcos Soares sempre ajudou disponibilizando informações pertinentes à obra da UHE Mauá.

Aos amigos da PPGCG: Wander, Miguel, Karol, Igor, Diuli, Marly, Marcos, André, Rodrigo, Eliziane, Meire, Alyne, Niarkios, Anderson.

Às amigas Mariana Tatagiba, Mariana Figueiredo, Mariângela, Évelin, Camila, Rose, Carolina, Livia, Natália, Alice e Glória por sempre me ouvir, me aconselhar e me apoiar em todas minhas decisões.

Aos alunos da iniciação científica Marcelo, Évelin e Letícia pela prontidão em ajudar no desenvolvimento do trabalho.

Aos Engenheiros Agrimensores e grandes amigos, André Borges, Marcos de Paulo, Leandro Amaral, Camila Diogo e Rosimeire Soares.

Aos Professores do PPGCG por terem me ajudado a acrescentar uma bagagem valiosa de conhecimentos.

Ao Professor Doutor Álvaro Muriel Lima Machado pelas dicas valiosas de programação.

Ao Professor Doutor Luis Augusto Koenig Veiga por estar sempre disposto a ajudar, esclarecer dúvidas e dar sugestões preciosas ao trabalho.

Ao Professor Doutor Carlos Aurélio Nadal por estar engajado ao projeto, partilhar boas ideias e estar sempre disposto a ajudar.

Ao Professor Doutor Pedro Luis Faggion por ter sido mais que um orientador, ter sido um “paizão” me ouvindo, aconselhando, me chamando atenção e se tornando um grande amigo.

*Deus não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos.
Fazer ou não fazer algo só depende da nossa vontade e perseverança.
(Albert Einstein)*

RESUMO

Esse trabalho busca avaliar a precisão do método de nivelamento trigonométrico, técnica *Leap-Frog*, no monitoramento de movimentos verticais em grandes estruturas, desenvolvendo um estudo de caso para a UHE Mauá. Tradicionalmente, esses deslocamentos são determinados a partir da técnica de nivelamento geométrico de precisão. Em decorrência da otimização do tempo ao utilizar estações totais, e por consequência a agilidade e rapidez na determinação das observações realizadas, foi realizado o nivelamento trigonométrico a partir dos pilares à montante da barragem fazendo visadas nas RRNN sobre a crista da mesma. O nivelamento geométrico foi feito paralelamente a fim de verificar a acurácia alcançada com a técnica *Leap-Frog*. Para o nivelamento geométrico foi desenvolvido um instrumental auxiliar devido às dificuldades encontradas na barragem. A técnica *Leap-Frog* foi avaliada então com a média dos desníveis encontrados a partir dos pilares geodésicos PG01 e PG02. Ao confrontar com os desníveis obtidos com o método direto, verificou-se que o método em estudo pode ser uma alternativa de nivelamento de precisão compatível ao nivelamento geométrico. Calculou-se o valor do coeficiente de refração para a UHE Mauá, porém não foi verificada uma melhoria nos valores de desníveis a partir do método indireto. Para o cálculo de recalque na crista na barragem, através dos métodos direto e indireto, foram encontrados valores menores que o recalque admissível para a estrutura em questão.

Palavras-Chave: Monitoramento, Nivelamento Geométrico, Técnica *Leap-Frog*, coeficiente de refração.

ABSTRACT

This research aims to evaluate the precision of trigonometric leveling, the Leapfrog technique, applied to monitor vertical movements of structures, developing a study case for the Hydroelectric Power Plant of UHE Mauá, traditionally, these displacement are determined from the technique of precision leveling. Considering the time gain by using total stations, and thus the speed and agility in the determination of the observations made, a trigonometric leveling was conducted from the pillars upstream of the dam's reservoir and taking aim at RRNN on the dam's crest. A Geometric Leveling was also done in order to check the precision reached using the Leapfrog technique and for that, auxiliary devices had to be built due to the position of the RRNN on the crest. The Leapfrog technique was evaluated using the average leveling differences found from geodetic pillars PG01 and PG02. Confronting the leveling differences from both techniques, it was observed that the Leapfrog could be an alternative as a high precision leveling technique, compatible with the Geometric Leveling. The refraction coefficient for the hydroelectric power plant of Mauá was calculated and applied, however it was not possible to observe a real improvement on level differences using the indirect technique. In order to calculate the settlement on the dam's crest both direct and indirect methods were applied, and the found values were smaller than the acceptable settlement values for the studied structure.

Keywords: Monitoring, Geometric leveling, Leapfrog Technique, Refraction coefficient.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MÉTODO TRADICIONAL	24
FIGURA 2 - MÉTODO RAMPADO.....	24
FIGURA 3 - EFEITO DA DISTORÇÃO ANGULAR NA ESTRUTURA	27
FIGURA 4 - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO COM UM LANCE	34
FIGURA 5 - NIVELAMENTO COM MAIS LANCES	35
FIGURA 6 - REDE, CIRCUITOS E LINHAS DE NIVELAMENTO	35
FIGURA 7 - PRINCIPAIS EIXOS DO NÍVEL	36
FIGURA 8 - EQUILÍBRIO HIDROSTÁTICO EM VASOS COMUNICANTES	38
FIGURA 9 - LEVANTAMENTO HIDROSTÁTICO.....	39
FIGURA 10 - OBTENÇÃO DO DESNÍVEL	42
FIGURA 11 - TÉCNICA <i>LEAP-FROG</i>	44
FIGURA 12 - ERRO DE ZÊNITE INSTRUMENTAL (Z_0)	47
FIGURA 13 - LEITURAS DO ÂNGULO ZENITAL EM PD E PI	47
FIGURA 14 - EFEITO DA CURVATURA TERRESTRE E REFRAÇÃO.....	49
FIGURA 15 - PERCURSO DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA NA ATMOSFERA IDEAL.....	51
FIGURA 16 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA	56
FIGURA 17 - LANÇAMENTO DE CCR PELO MÉTODO RAMPADO.....	57
FIGURA 18 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DA UHE MAUÁ.....	58
FIGURA 19 - VISTA À MONTADE DA BARRAGEM.....	59
FIGURA 20 - CONTATO GEOLÓGICO NA PAREDE DO TÚNEL DE DESVIO COM O SILTITO (CLARO) MERGULHANDO SOB O DIABÁSIO (ESCURO).....	60
FIGURA 21 - CONSTRUÇÃO DO BENCHMARK	61
FIGURA 22 - PG01 SOBRE UM AFLORAMENTO ROCHOSO.....	62
FIGURA 23 - PILAR À DIREITA DA MARGEM (PG01) COM A CHAPA AFIXADA À BASE DA PLATAFORMA (RN-5)	63
FIGURA 24 - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO A PARTIR DO PG01.....	64
FIGURA 25 - DISPOSIÇÃO DO EQUIPAMENTO ENTRE AS RRNN	65
FIGURA 26 - MARCA NO PILAR PARA O POSICIONAMENTO DA MIRA.....	66
FIGURA 27 - MIRA APOIADA SOBRE UM PINO E MEDIÇÃO DA ALTURA DO MESMO.....	66
FIGURA 28 - TRIPÉ MODIFICADO E USO DA ESCADA PARA REALIZAÇÃO DA PONTARIA	68
FIGURA 29 - SUPORTE PARA O ESPELHO	68
FIGURA 30 - VISÃO DA BOLHA NO ESPELHO ACOPLADO À MIRA	69
FIGURA 31 - BIPÉ MODIFICADO PARA GARANTIR A VERTICALIDADE DA MIRA	70
FIGURA 32 - VISTA À MONTANTE DA UHE MAUÁ COM AS VISADAS A PARTIR DO PG01	71
FIGURA 33 - PRISMA ENCAIXADO, PINO ADAPTADOR E PINO DE AÇO INOXIDÁVEL	71
FIGURA 34 - PRISMA NA BASE NIVELANTE	73
FIGURA 35 - PRISMA NA VISADA DE VANTE	73
FIGURA 36 - PEÇA UTILIZADA PARA TRAVAR O PARAFUSO CALANTE	74

FIGURA 37 - PARAFUSO CALANTE TRAVADO COM A PEÇA DESENVOLVIDA E ABRAÇADEIRA	74
FIGURA 38 - MEDIDA DA ALTURA DA BASE UTILIZANDO PAQUÍMETRO.....	75
FIGURA 39 - POSIÇÕES APROXIMADAS DOS PONTOS ONDE FORAM FEITAS AS SÉRIES DE LEITURAS.....	75
FIGURA 40 - ESQUEMA PARA COINCIDIR OS PLANOS DE REFERÊNCIA DO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E TRIGONOMÉTRICO.....	76
FIGURA 41 - ERRO NA DISTÂNCIA PROVOCADO PELA TEMPERATURA E PRESSÃO.....	77
FIGURA 42 - DESNÍVEIS RELATIVOS CALCULADOS A PARTIR DO MÉTODO DIRETO.....	84
FIGURA 43 - DESNÍVEIS RELATIVOS CALCULADOS A PARTIR DO MÉTODO INDIRETO	84
FIGURA 44 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DESNÍVEIS ENCONTRADOS A PARTIR DOS MÉTODOS DIRETO E INDIRETO	91
FIGURA 45 - MOVIMENTOS VERTICAIS OBTIDOS A PARTIR DO MÉTODO DIRETO.....	92
FIGURA 46 - MOVIMENTOS VERTICAIS OBTIDOS A PARTIR DO MÉTODO INDIRETO	92
FIGURA 47 - VELOCIDADE DE RECALQUE NA CRISTA DA BARRAGEM A PARTIR DOS MÉTODOS DIRETOS E INDIRETO.....	94

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - ESPECIFICAÇÕES QUANTO ÀS PRECISÕES	33
QUADRO 2 - SEÇÕES DE NIVELAMENTOS	63
QUADRO 3 - DESNÍVEIS OBTIDOS A PARTIR DO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO	81
QUADRO 4 - DIFERENÇA ENTRE OS DESNÍVEIS OBTIDOS PELO MÉTODO DIRETO	82
QUADRO 5 - DESNÍVEIS RELATIVOS A PARTIR DA MÉDIA ENTRE OS PILARES PG01 E PG02 A PARTIR DA TÉCNICA DE <i>LEAP-FROG</i>	82
QUADRO 6 - DIFERENÇA ENTRE OS DESNÍVEIS OBTIDOS PELO MÉTODO INDIRETO USANDO $K=0,13$	83
QUADRO 7 - PRECISÃO ALCANÇADA COM A TÉCNICA <i>LEAP-FROG</i> A PARTIR DO PG01 EM MARÇO DE 2012	85
QUADRO 8 - PRECISÃO ALCANÇADA A PARTIR DO PG02 EM MARÇO DE 2012	86
QUADRO 9 - PRECISÃO ALCANÇADA A PARTIR DO PG01 EM JUNHO DE 2012	86
QUADRO 10 - PRECISÃO ALCANÇADA COM A TÉCNICA <i>LEAP-FROG</i> A PARTIR DO PG02 EM JUNHO DE 2012	86
QUADRO 11 - PRECISÃO ATINGIDA A PARTIR DA MÉDIA DOS DESNÍVEIS EM MARÇO DE 2012	87
QUADRO 12 - PRECISÃO ATINGIDA A PARTIR DO PG01 EM JUNHO, JULHO E AGOSTO.....	88
QUADRO 13 - PRECISÃO ATINGIDA A PARTIR DO PG02 EM JUNHO, JULHO E AGOSTO.....	88
QUADRO 14 - PRECISÃO ATINGIDA A PARTIR DA MÉDIA EM JUNHO, JULHO E AGOSTO.....	89
QUADRO 15 - DESNÍVEIS VARIANDO O COEFICIENTE DE REFRAÇÃO	89
QUADRO 16 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DESNÍVEIS ENCONTRADOS A PARTIR DOS MÉTODOS DIRETO E INDIRETO	90
QUADRO 17 - RECALQUE DIFERENCIAL E DISTORÇÃO ANGULAR REFERENTE À CRISTA DA BARRAGEM	94

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.3 JUSTIFICATIVA	20
2 REVISÃO TEÓRICA	22
2.1 BARRAGENS DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)	22
2.2 RECALQUE	25
2.3 SEGURANÇA DE BARRAGENS	28
2.3.1 Monitoramento geodésico	30
2.3.2 Monitoramento físico ou geotécnico	31
2.4 DETERMINAÇÃO DE DESNÍVEL	32
2.4.1 Métodos diretos	32
2.4.1.1 Nivelamento geométrico	32
2.4.2 Método das visadas iguais	33
2.4.2.1 Sistemas de eixos e fontes de erros no nivelamento geométrico	36
2.4.2.2 Nivelamento hidrostático	38
2.4.3 Métodos indiretos	40
2.4.3.1 GNSS	41
2.4.3.2 Nivelamento trigonométrico	42
2.4.3.2.1 Técnica <i>Leap-Frog</i>	44
2.4.3.3 Erros instrumentais no nivelamento trigonométrico	46
2.5 EFEITO DA REFRAÇÃO E CURVATURA TERRESTRE	48
2.5.1 Efeito da refração na determinação do desnível	49
2.5.2 Curvatura terrestre na determinação do desnível	49
2.5.3 Índice de refração	50
2.5.4 Cálculo do Coeficiente de Refração (k)	53
3 METODOLOGIA PROPOSTA	56
3.1 EXPERIMENTOS REALIZADOS	56
3.2 DESCRIÇÃO DA UHE MAUÁ	57

3.3 <i>BENCHMARKS</i>	60
3.4 MÉTODOS APLICADOS NOS LEVANTAMENTOS	62
3.4.1 Equipamentos e Materiais	67
3.4.2 Nivelamento trigonométrico: Técnica <i>Leap-Frog</i>.....	70
3.4.2.1 Correção da distância	76
3.4.2.2 Materiais.....	78
3.5 ANÁLISE DO RECALQUE	78
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	96
5.1 CONCLUSÕES	96
5.2 RECOMENDAÇÕES.....	97
REFERÊNCIAS.....	98
ANEXO A	106

LISTA DE SIGLAS

ANA	- Agência Nacional das Águas
CBDB	- Comitê Brasileiro de Barragens
CCR	- Concreto Compactado à Rolo
CCV	- Concreto Convencional
CIGB	- Comissão Internacional de Grandes Barragens
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite System</i>
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MED	- Medidores Eletrônicos de Distância
NBR	- Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
PNSB	- Política Nacional de Segurança de Barragens
RNP	- Referência de Nível Profunda
RRNN	- Conjunto de referências de nível
SNISB	- Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UHE	- Usina Hidrelétrica

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de grandes estruturas¹ utilizando a Auscultação Geodésica vem crescendo, porém são necessárias pesquisas que busquem o desenvolvimento de novas tecnologias para tornar mais ágil a coleta e processamento dos dados objetivando a detecção e caracterização de eventuais deslocamentos da estrutura. Segundo Kuperman *et al.* (2005) estes processos devem ser realizados durante toda a vida útil da estrutura, de forma a fornecer informações necessárias para uma eventual revisão ou adaptação nos procedimentos adotados na construção, operação ou manutenção. Assim, é possível definir a etapa de controle, permitindo ainda verificar se uma dada condição de risco está se desenvolvendo ou se é viável de ocorrer.

Associada ao monitoramento de estruturas a Auscultação Geodésica pode definir e confrontar as coordenadas de pontos em épocas distintas e determinar se dentro de certo nível de confiança há alterações significativas nestas coordenadas (ANDOLFATO, 2010).

Quando busca-se a determinação da variação da coordenada Z (movimentos verticais) em estruturas de grandes obras aplica-se o nivelamento geométrico de alta precisão, técnica essa considerada consagrada devido à consistência e precisão dos resultados, porém se trata de um processo lento e consequentemente oneroso. Em decorrência disso, abre-se assim um caminho para as alternativas baseadas nos métodos indiretos, entre eles o nivelamento trigonométrico e a utilização do GNSS (Global Navigation Satellite System).

Pensando nisso, e associando à otimização do tempo ao utilizar Estações Totais robotizadas, fica evidenciado o assunto desse trabalho: avaliação do método de nivelamento trigonométrico no monitoramento de recalque em estruturas.

Muitas obras de engenharia necessitam desse tipo de monitoramento, tais como: edifícios, pontes, estádios, barragens, entre outras. Este trabalho está baseado em um estudo de caso para a Usina Hidrelétrica (UHE) Mauá, vinculado ao projeto *Levantamento geológico-estrutural da região e entorno da barragem da UHE*

¹ No presente trabalho será adotado o termo “grandes estruturas” sempre que for citada alguma intervenção antrópica, seja qual for sua aplicação e seu porte (ex: barragens, túneis, edifícios, etc.).

Mauá, uma abordagem inovadora para o monitoramento geodésico nos pontos de risco.

Trabalhos apresentaram comparações entre desníveis determinados por nivelamento trigonométrico e nivelamento geométrico de precisão, porém nesse estudo de caso será enfatizado o monitoramento de recalque na UHE Mauá avaliando o método de nivelamento trigonométrico, especificamente a técnica *Leap-Frog*.

Salomão (2008) realiza a determinação dos recalques sofridos em um edifício em Curitiba, utilizando nivelamento trigonométrico e comparando os resultados obtidos das observações utilizando o nivelamento geométrico. Analisando os resultados obtidos verificou-se variações no recalque inferiores a 2,13 cm. A partir desses resultados o autor reafirma que a técnica de nivelamento geométrico atende, com qualidade, a finalidade de monitorar recalque. O autor recomendou maiores estudos quanto a utilização do método de nivelamento trigonométrico.

GOMES (2006) estimou a acurácia na determinação de desníveis empregando estações totais classificadas pela ABNT como de baixa, média e de alta precisão, em comparação com os desníveis obtidos pelo método do nivelamento geométrico de precisão, conduzidos segundo as Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos do IBGE. Foram realizados experimentos utilizando visadas desiguais, sendo que nestes casos é necessária a aplicação da correção referente à curvatura terrestre e do efeito da refração no ângulo. Nesse trabalho, duas situações foram investigadas em função das condições meteorológicas: estado neutro da atmosfera e estado instável de turbulência da atmosfera (considerando observações diurnas, mais comuns nos levantamentos). Os experimentos em condições de atmosfera neutra ofereceram resultados consistentes, compatíveis com os resultados obtidos para visadas de igual comprimento. Já na segunda situação a simples adoção de um índice de refração único melhoram os resultados. Com esse trabalho, demonstrou-se que há a viabilidade de obtenção de desníveis de primeira ordem com Estação Total, porém verificou-se que para visadas de comprimentos desiguais o efeito de refração no ângulo vertical deve ser levado em conta.

A proposta deste trabalho é monitorar os movimentos verticais da barragem da usina hidrelétrica (UHE) Mauá utilizando nivelamento geométrico (método consagrado na determinação de desníveis de precisão) e nivelamento trigonométrico, técnica *Leap-Frog*. Tendo em vista que essa última técnica é conduzida com Estação Total, subentende-se um alto rendimento no trabalho de campo e ao utilizar o equipamento robotizado, as observações são realizadas sem a interferência do operador.

Para viabilizar este experimento foram realizadas quatro campanhas para coletar dados aplicando nivelamento geométrico de primeira ordem e nivelamento trigonométrico, técnica *Leap-Frog*, utilizando Estação Total robotizada. A partir dos dados obtidos com a Estação Total calculou-se o coeficiente de refração para o momento das observações e aplicou-se na determinação do desnível pela técnica *Leap-Frog*. A partir dos desníveis calculados com os dois métodos foi então avaliada a técnica em investigação e ainda a interferência do uso do coeficiente de refração calculado.

Cabe salientar que todos os cálculos foram realizados em ambiente MATLAB, através do desenvolvimento de um aplicativo que automatiza o processo desde a coleta dos dados até a obtenção do desnível.

Este trabalho presume uma alternativa de monitoramento geodésico durante e após o período de formação do reservatório da UHE Mauá, abrindo caminhos para novas ferramentas que poderão ser empregadas em outras grandes estruturas.

1.1 OBJETIVO

Avaliar a precisão do método de nivelamento trigonométrico, técnica *Leap-Frog*, no monitoramento de deslocamentos verticais em grandes estruturas, através do estudo de caso na UHE Mauá.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar o desnível entre as RRNN da crista da barragem a partir do método direto (nivelamento geométrico) e indireto (nivelamento trigonométrico, técnica *Leap-Frog*);
- Estudar a técnica *Leap-Frog*, utilizando como referência os desníveis obtidos com o nivelamento geométrico;
- Determinar o coeficiente de refração (k) para a região da UHE Mauá e comparar os desníveis calculados a partir do coeficiente padrão (0,13) e do coeficiente calculado;
- Determinar o recalque absoluto e o diferencial, a distorção angular e a velocidade de recalque utilizando o nivelamento geométrico a partir do método de visadas iguais e recalculá-lo a partir dos dados obtidos com o nivelamento trigonométrico, técnica *Leap-Frog*;
- Analisar a diferença entre o recalque encontrado e o admissível a partir do teste t de *Student* para uma média;
- Desenvolver um aplicativo em ambiente MATLAB para que os cálculos sejam automatizados.

1.3 JUSTIFICATIVA

Como já foi dito, a técnica de nivelamento geométrico é considerada consagrada nos levantamentos altimétricos devido à precisão oferecida. No entanto, trata-se de um processo lento e por consequência, oneroso. Diante disso e da modernização das estações totais, tanto em termos de manuseio quanto de precisão, destaca-se então a aplicação desses equipamentos para levantamentos altimétricos de alta precisão. Em obras de grande porte como a UHE Mauá é preciso buscar alternativas onde o processo seja mais rápido e eficaz permitindo a análise do comportamento de determinados pontos da estrutura.

Para o controle de recalque da UHE Mauá é necessário utilizar pinos sobre a mureta de 1,55 metros de altura em relação à pista de rolamento dificultando,

consideravelmente, a aplicação do nivelamento geométrico. Além disso, trata-se de uma extensão com 745 metros de crista tornando o processo demorado.

Em decorrência dessas dificuldades a metodologia aqui avaliada é viável, requer menos tempo de execução e apresenta a possibilidade de oferecer uma precisão compatível com o método aplicado até então no monitoramento vertical de grandes estruturas (nivelamento geométrico).

2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica empregada na presente pesquisa. Serão abordados assuntos relacionados com o tema desse trabalho, entre eles: barragens de concreto compactado com rolo, recalque, segurança de barragens, instrumentação geodésica, métodos diretos e indiretos para a determinação de desnível, efeito da refração e curvatura terrestre.

2.1 BARRAGENS DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)

Nos últimos anos, tem ocorrido um aumento do número de barragens construídas com Concreto Compactado com Rolo (CCR), justificado devido às vantagens que essa técnica permite: agilidade de execução e redução no custo da obra (FILHO, 2003).

Segundo Mehta e Monteiro (1994) o CCR é um concreto sem abatimento², transportado, lançado e compactado com os mesmos equipamentos de construção que são empregados para barragens de terra e enrocamento, podendo assim satisfazer as especificações de projeto de concreto-massa convencional.

O DNER (1992) define o CCR como “um concreto seco, de consistência dura e com trabalhabilidade tal que permite receber compactação por rolos compressores, vibratórios ou não”. Este aspecto é marcante, pois o CCR como concreto fresco não apresenta abatimento no ensaio de tronco de cone ou também conhecido como *slump test*, ou seja, o abatimento é nulo; o material possui dessa forma condições de ser adensado por emprego de rolos compactadores pesados.

Durante a execução, as misturas de CCR devem ter uma consistência que admita a utilização de rolos vibratórios para a sua compactação e para comportar os equipamentos necessários em sua confecção. A quantidade de pasta utilizada deve ser proporcional a uma consistência que permita uma distribuição uniforme da massa durante a mistura, lançamento e adensamento (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

² O abatimento do tronco de cone de concreto é a distância entre o plano correspondente à base superior do molde e o centro da base superior da amostra abatida, medida com régua metálica.

No Brasil, a primeira aplicação de CCR em barragens ocorreu em 1978, na Itaipu Binacional. Nessa ocasião foi aplicado na rampa de acesso às fundações da estrutura de desvio um volume de 26.000 m³, com pico de concretagem de 3.054m³/dia. Nesse mesmo ano, na barragem de São Simões em Goiás foi utilizado o CCR, onde foram lançadas aproximadamente 40.000 m³, em camadas de 50 cm de altura, no preenchimento das galerias de desvio, na regularização e na parede de concreto (KUPERMAN, 1996).

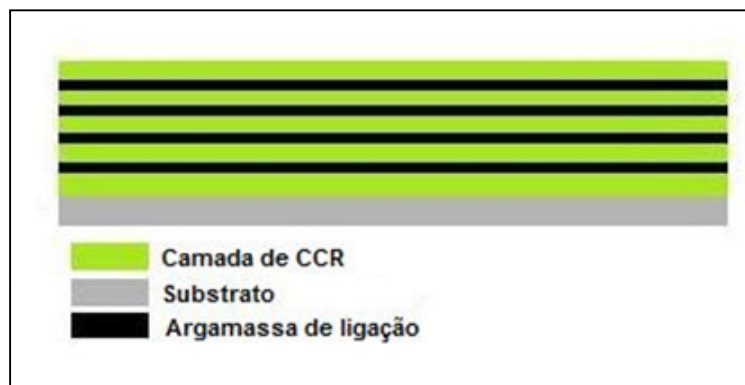
Segundo Andriolo (1998), uma importante aplicação de CCR no Brasil aconteceu em 1986, quando a barragem de Saco de Nova Olinda – Paraíba, foi construída em pouco mais de três meses, com 56 m de altura e um volume de CCR de 138.000 m³, alcançando um pico de concretagem de 2.500 m³/dia. Essa foi a primeira barragem brasileira construída totalmente com CCR e também a primeira barragem de CCR em arco construída no mundo. Sendo assim, os resultados e detalhes desta obra foram destacados no cenário nacional e mundial. Em 1996, foi concluída no Rio Jordão, Paraná, a barragem da Derivação do Rio Jordão, com altura máxima de 95 m e 57.000 m³ de CCR. Foi ainda concluída em 1998 a barragem da UHE Salto Caxias, com 67 m de altura e 954.000 m³ de CCR, a de maior volume de CCR do país.

São duas as metodologias para a construção de barragem em CCR: a tradicional, onde a construção da barragem é feita em camadas horizontais; e a metodologia rampado, que consiste basicamente no lançamento de camadas formando uma rampa.

O número de barragens utilizando CCR é de aproximadamente 350 construídas no mundo das quais cerca de 50 encontram-se no Brasil. A UHE Mauá em estudo localiza-se dentro dessa estimativa.

O Método Tradicional (Figura 1) consiste no lançamento de camadas horizontais de CCR, resultando em um tempo de exposição da camada anterior de pelo menos 12 horas até sua cobertura pela camada subsequente. Devido a essa exposição, torna-se necessário a aplicação de modo sistemático de argamassa de ligação entre as camadas sucessivas (BATISTA *et al.* 2002).

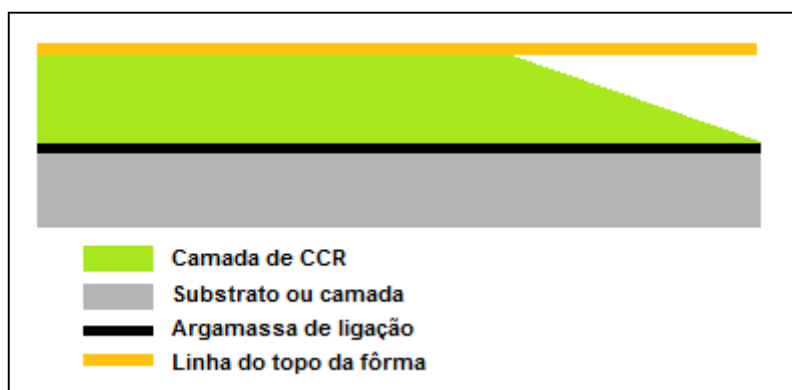
FIGURA 1 - MÉTODO TRADICIONAL



FONTE: ADAPTADA DE BATISTA *et al.* (2002)

O Método Rampado (Figura 2) é executado em camadas de CCR em rampa onde a altura varia de 1,80 m a 3,00 m, com subcamadas de 30 cm a 35 cm de altura. Essas subcamadas são, por consequência, executadas em rampa com declividade variando de 7% a 10%, resultando em uma superfície de exposição reduzida. Com isso, torna-se desnecessário a aplicação da argamassa de ligação entre as subcamadas, sendo assim necessária a aplicação da argamassa somente no trecho da camada em rampa, onde há o contato com a camada anterior de 2,0 m (BATISTA *et al.* 2002).

FIGURA 2 - MÉTODO RAMPADO



FONTE: ADAPTADA DE BATISTA *et al.* (2002)

As propriedades importantes para o Concreto Convencional (CCV) também são usuais para o CCR, quando utilizados os mesmos materiais, ficando as diferenças aos menores teores de água e de pasta quando empregado o CCR (OLIVEIRA E SALLES, 1995). De acordo com o documento do *Corps of Engineers* (2000) as propriedades do CCR endurecido são similares às do CCV. As diferenças

existentes são devidas ao baixo consumo de água no CCR, no momento da sua dosagem, gerando um maior índice de vazios devido à falta de água para formar a pasta. Com o CCR não é possível a confecção de estruturas delgadas como quando utilizado o CCV. Este fato decorre da granulometria dos agregados, da dificuldade no processo de adensamento, do baixo consumo de cimento e do uso de materiais minerais utilizados como adições em alguns projetos.

As barragens de gravidade construídas utilizando o CCR representam uma economia significativa sobre o uso do CCV quanto aos materiais, principalmente sobre o consumo de cimento, em complementação às técnicas de construção. O desafio está em tornar as barragens deste tipo seguras, duráveis e com bom desempenho ao longo de toda a sua existência, o que vem acontecendo com a evolução no processo construtivo. Em função da redução no tempo de construção, de 1 a 2 anos, de uma barragem de CCR quando comparado com uma barragem de terra, esta se torna mais econômica com redução também das dimensões da estrutura (*CORPS OF ENGINEERS*, 1995).

2.2 RECALQUE

Recalque é definido pelo deslocamento vertical descendente de um elemento estrutural, já o deslocamento ascendente representa a elevação. Por convenção, o recalque é representado com o sinal positivo (ABNT, 1996).

O recalque absoluto refere-se então a um único elemento estrutural, sendo calculado a partir da equação a seguir (ALONSO, 1991):

$$r_i = h_{t1}^i - h_{t2}^i \quad (01)$$

Sendo:

r_i : Recalque absoluto de um determinado ponto i, em metros;

h_{t1}^i : cota do ponto i no instante 1, em metros;

h_{t2}^i : cota do mesmo ponto no instante 2, em metros.

O recalque diferencial, segundo Alonso (1991), é dado pela relação entre a diferença dos recalques entre dois pontos.

$$\Delta r_{ij} = r_i - r_j \quad (02)$$

Sendo:

Δr_{ij} : Recalque diferencial entre os pontos i e j, em metros;

r_i : recalque absoluto no ponto i, em metros;

r_j : recalque absoluto no ponto j, em metros.

De acordo com a ABNT (1996), o recalque diferencial específico, também conhecido com distorção angular, é o que deve ser tratado com mais atenção, pois eles são os que podem prejudicar mais a estabilidade e funcionamento de uma estrutura. Por consequência, impõe distorções à estrutura que, dependendo de sua intensidade, poderão originar fissuras (Figura 3).

Segundo Alonso (1991) a distorção angular é definida como:

$$\delta = \frac{\Delta r_{ij}}{\ell} \quad (03)$$

Sendo:

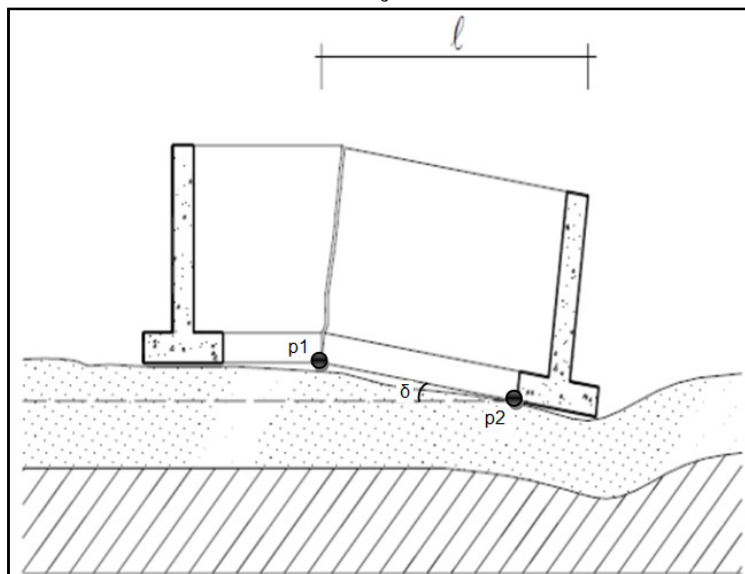
δ : Distorção angular, em radianos;

Δr : recalque diferencial entre os pontos i e j, em metros;

ℓ : distância entre os pontos, em metros.

Na figura 3 é ilustrado os pontos i e j, a distância ℓ entre eles e uma possível fissura ocasionada pelo efeito de distorção angular.

FIGURA 3 - EFEITO DA DISTORÇÃO ANGULAR NA ESTRUTURA



FONTE: ADAPATADO FABRÍCIO e ROSSIGNOLO (sd.)

Segundo Alonso (1991) caso todos os elementos de fundação sofram o mesmo recalque absoluto, a distorção angular será nula e, com isso, não ocorrerão fissuras na estrutura devidas ao recalque analisado. No entanto, dependendo da grandeza desse recalque, podem surgir problemas de funcionalidades. Assim sendo, tanto os recalques absolutos quanto os diferenciais devem ser mantidos entre limites prefixados, para que a estrutura desempenhe suas finalidades. Por esse motivo, existe a necessidade de estabelecer o que se denomina recalque admissível (ALONSO, 1991). Esse valor é estabelecido pelos especialistas envolvidos com o projeto, execução e acompanhamento do desempenho da obra (ABNT, 1996).

Além do controle de recalques diferenciais, mantendo-os entre valores que não causem danos à estrutura, a velocidade do recalque também deve ser controlada. Esta é dada pela relação entre o recalque absoluto e o intervalo de tempo (ALONSO, 1991):

$$Vr_i = \frac{r_i}{\Delta t} \quad (04)$$

Onde:

Vr_i : Velocidade de recalque no ponto i, em metros por dia;

Δt : intervalo de tempo entre as observações, em dias.

2.3 SEGURANÇA DE BARRAGENS

Em 1979 a segurança de barragens passou a ser um tema de destaque na Comissão Internacional de Grandes Barragens – CIGB, quando se detectou um considerável aumento na construção de barragens em países com pouca ou até mesmo nenhuma experiência em engenharia de barragens. Além disso, foram também identificados incidentes, além do aumento considerável do tamanho das barragens que eram construídas naquela época (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2011).

No Brasil, o representante da CIGB é o Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB. Em 1979 o CBDB publicou um documento intitulado: Diretrizes para Inspeção e Avaliação da Segurança de Barragens em Operação. Com isso, outras recomendações e diretrizes foram geradas pelo próprio CBDB e pelo Ministério da Integração Nacional.

No XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, realizado em Belo Horizonte – MG, em março de 1999, foi apresentado ao público o Guia Básico de Segurança de Barragem. Esse manual tem como objetivo ajudar a ter novas barragens seguras, quaisquer que sejam seus proprietários e manter as já construídas em um estado de segurança compatível com seu papel social (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2001).

A classificação de cada barragem deve ser feita em função das consequências de sua ruptura. Essa classificação é essencial para a análise da segurança da barragem, além de fixar níveis adequados de atividade de inspeção. Na tabela 1 é representado o sistema de classificação usualmente aceitável, com base no potencial de perda de vidas e nos danos econômicos ligados à ruptura da barragem (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2001).

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DA CONSEQUÊNCIA DE RUPTURA DE BARRAGENS

CONSEQUÊNCIA DE RUPTURA	PERDA DE VIDAS	ECONÔMICO, SOCIAL E DANOS AMBIENTAIS
Muito alta	Significativa	Dano excessivo*
Alta	Alguma	Dano substancial
Baixa	Nenhuma	Dano moderado
Muito baixa	Nenhuma	Dano mínimo

*Os critérios de classificação de categorias de danos econômicos, sociais e ambientais devem ser baseados nas consequências das perdas em relação à região afetada.

FONTE: ADAPTADO DE COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (2001)

Outros sistemas alternativos de classificação podem ser tomados, para interpretar e distinguir os requisitos para observação de barragens e inspeções de segurança.

Na tabela 1, as categorias de consequências são baseadas no incremento de perdas que uma ruptura confere às áreas à montante, jusante ou na própria barragem. Vale ressaltar ainda que a diferenciação entre as categorias de consequência e o relacionamento com os requisitos de segurança são sugeridos, a fim de refletir os valores e prioridades da sociedade na alocação de recursos e fundos a serem empregados na proteção e salvamento de vidas, e para ainda a preservação de propriedades (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2001).

Além do Guia Básico tem-se o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens editado pelo Ministério da Integração Nacional, em 2002, com a finalidade de estabelecer parâmetros e uma rotina básica com o intuito de orientar os procedimentos de segurança a serem seguidos em novas barragens, independente de quem sejam seus proprietários, além de manter as já construídas em um estado de segurança combinante com seu interesse social e de desenvolvimento. O manual ainda estabelece que toda barragem deve ser instrumentada de acordo com o seu porte e riscos associados, e que ainda os dados das leituras sejam analisados periodicamente (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2001).

Em 20 de setembro de 2010, o presidente da república Luís Inácio Lula da Silva sancionou a Lei 12.334/2010 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB, destinada à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e

cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB. De acordo com essa nova Lei, a Agência Nacional das Águas – ANA ficará incumbida de organizar, implantar e gerir o SNISB, promover a articulação entre os órgãos fiscalizadores das barragens e ainda coordenar o Relatório de Segurança de Barragem, encaminhando-o anualmente ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH (ANA, 2010).

Esta Lei tem como objetivo garantir a observância de padrões de segurança de barragens, de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências, além de regulamentar as ações e padrões de segurança (BRASIL, Lei 12.334/2010, 2010).

Ainda de acordo com a Lei 12.334/2010 o responsável legal pela segurança da barragem, será o empreendedor cabendo-lhe o desenvolvimento de ações para garantir a segurança. Ela estabelece ainda que a fiscalização da segurança das barragens caberá à entidade que outorgou o direito de uso dos recursos hídricos, observado o domínio desses recursos hídricos, com exceção de fins de aproveitamento hidrelétrico. Ficará também a cargo da fiscalização a entidade que concedeu ou autorizou o uso potencial hidráulico quando se tratar de uso para fins de geração de energia (BRASIL, Lei 12.334/2010, 2010).

A implantação do cadastro das barragens deve ser feita pelo órgão fiscalizador, com prazo de dois anos. Os empreendedores de barragens devem ainda submeter à aprovação dos órgãos fiscalizadores relatórios especificando as ações e cronograma para a implantação do Plano de Segurança de Barragem (BRASIL, Lei 12.334/2010, 2010).

Vale ressaltar que atualmente, ainda não existe legislação específica a respeito de segurança de barragens, no entanto espaços para discussão nos últimos simpósios do CBDB contribuirão para novos rumos de uma legislação adequada.

2.3.1 Monitoramento geodésico

Segundo Kahmen e Faig (1988), os métodos geodésicos de monitoramento provêm os deslocamentos absolutos de pontos de interesse em relação a outros

pontos localizados fora da área de influência do corpo deformável e que ainda tenham suas coordenadas conhecidas.

Kuang (1996) cita como principais métodos de monitoramento geodésico a poligonação, triangulação, trilateração, a partir de dados GNSS e ainda através de nivelamento geométrico, sendo esse último visto com mais detalhes na Seção 2.4.1.

Segundo Granemann (2005) os instrumentos geodésicos que mais se destacam no monitoramento de estruturas são: teodolitos, estações totais, níveis, miras de invar, trenas, prismas de reflexão e gravímetros.

Para o monitoramento vertical na UHE Mauá será aplicado o nivelamento geométrico de precisão juntamente ao nivelamento trigonométrico. Para a realização desses métodos supracitados será utilizados nível digital, estação total e alguns acessórios que serão descrito no decorrer do presente trabalho.

2.3.2 Monitoramento físico ou geotécnico

De acordo com US ARMY (1995a) os principais objetivos da instrumentação geotécnica podem ser divididos em quatro grupos distintos: Avaliação Analítica; Previsão de Desempenho Futuro; Avaliação Legal e Desenvolvimento e; Verificação de Projetos Futuros.

O comportamento de um maciço pode ser acompanhado por diferentes parâmetros a partir de instrumentação geotécnica (US ARMY, 1995b):

- Vazões de percolação;
- Pressão porosa nas fundações;
- Carregamento de partículas através da percolação no maciço da estrutura;
- Atividades sísmicas;
- Deformação de maciço e fundações;
- Empuxos de terra sobre estruturas de concreto e,
- Tensões no aterro.

São utilizados diferentes instrumentos e técnicas na determinação desses parâmetros: inclinômetros, piezômetros, análise química e da turbidez da água, pêndulos, medidores de vazão, células de pressão, entre outros (US ARMY, 1995b).

De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens (2001) os requisitos gerais para instrumentação devem ser apontados antes da avaliação da segurança do empreendimento e a necessidade de instrumentação aditiva deverá ser justificada e documentada. A necessidade e o tipo de instrumentação são influenciados pela geologia da fundação, o tamanho e o tipo de barragem e seu reservatório, a localização, a classificação por consequência de ruptura, entre outros.

2.4 DETERMINAÇÃO DE DESNÍVEL

Para se obter a cota³ ou altitude de um ponto é necessária a determinação do desnível entre dois pontos e ainda deve-se conhecer a cota de um ponto de partida. Existem métodos diretos e indiretos que permitem determinar os desníveis com precisão podendo chegar a precisões sub-milimétricas. A aplicação de cada um dependerá do objetivo do trabalho. Alguns métodos serão descritos a seguir, porém uma maior ênfase será dada ao nivelamento geométrico e trigonométrico, métodos esses que serão aplicados no desenvolvimento desse trabalho.

2.4.1 Métodos diretos

Como método direto para a determinação de desníveis tem-se o nivelamento geométrico e o nivelamento hidrostático.

2.4.1.1 Nivelamento geométrico

Sabe-se que o nivelamento geométrico é o método tradicional utilizado ao se tratar da determinação de desníveis de precisão, de acordo com a Resolução da Presidência do IBGE n° 22, de 21/07/1983, que ainda se encontra em vigor, onde

³ Nesse trabalho será usado o termo “cota”, pois elas são referidas à superfície de nível arbitrária, acima ou abaixo do Nível Médio dos Mares (NMM).

foram aprovadas as Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos, que podem ser aplicadas para fins topográficos ou geodésicos.

O IBGE estabelece especificações quanto às precisões ao desenvolver o nivelamento geométrico, conforme o quadro 1:

QUADRO 1 - ESPECIFICAÇÕES QUANTO ÀS PRECISÕES

CONTROLE PARA QUALIDADE	LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS			
	De alta precisão	De precisão		Fins topográficos
	Fundamental	Áreas mais desenvolvidas	Áreas menos desenvolvidas	Local
Diferença máxima aceitável entre o nivelamento e o contra-nivelamento de uma linha.	3mm√k	6mm√k	8mm√k	12mm√k

* k é igual à média das distâncias niveladas e contra niveladas em quilômetros

FONTE: ADAPTADO DE IBGE (1983)

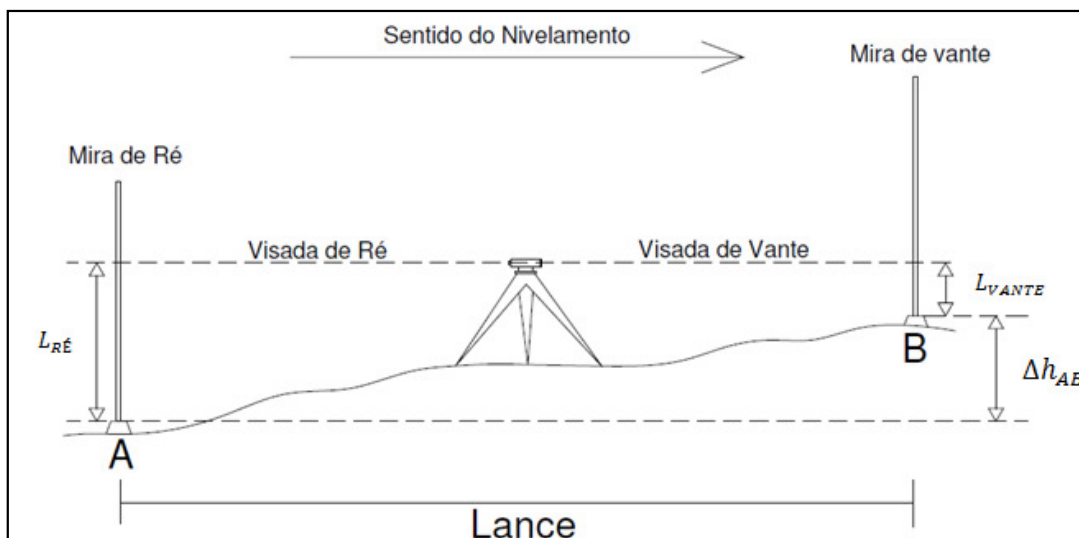
De acordo com Asin (1990) é possível dividir o nivelamento geométrico em quatro métodos: método de visadas iguais, visadas extremas, visadas recíprocas e ainda visadas equidistantes. Será discutido somente o método das visadas iguais, pois se trata do método empregado no presente trabalho.

2.4.2 Método das visadas iguais

No método de visadas iguais, o equipamento deve ser instalado com uma distância equivalente entre o ponto de ré e vante (IBGE, 1983).

Segundo Kahmen e Faig (1988) cabe salientar que com o equipamento instalado nessa posição (centro do lance) minimiza-se o erro de colimação vertical do nível (Figura 4).

FIGURA 4 - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO COM UM LANCE



FONTE: A autora (2012)

A diferença de nível de A para B, ou desnível, é dada pela relação:

$$\Delta h_{AB} = L_{RÉ} - L_{VANTE} \quad (05)$$

Onde:

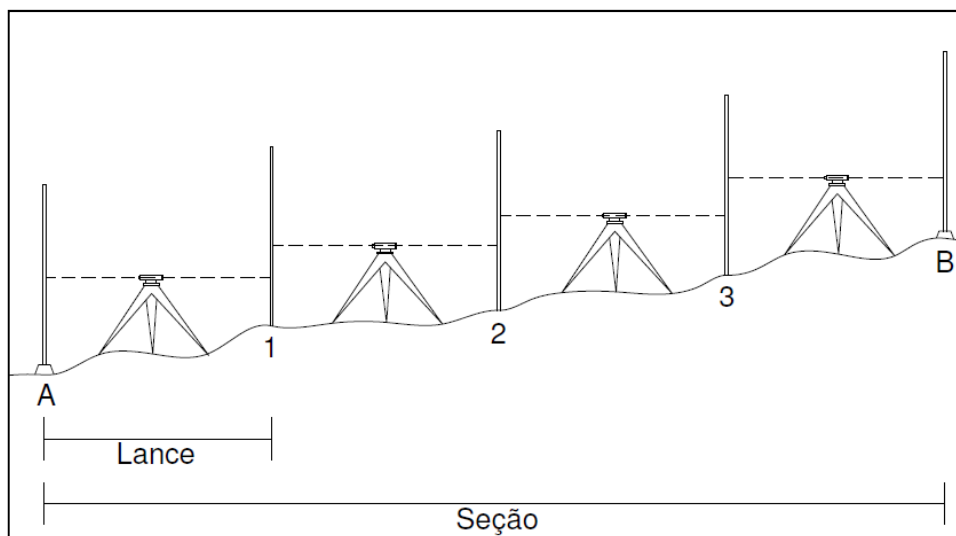
Δh_{AB} : Desnível de A para B;

$L_{RÉ}$: leitura realizada com a mira posicionada em A (leitura de ré);

L_{VANTE} : leitura realizada com a mira posicionada em B (leitura de vante).

A figura 5 ilustra um esquema de determinação de desníveis com vários lances, também conhecido como nivelamento composto. Nesses casos o desnível final é obtido pela soma dos desníveis de cada lance.

FIGURA 5 - NIVELAMENTO COM MAIS LANCES

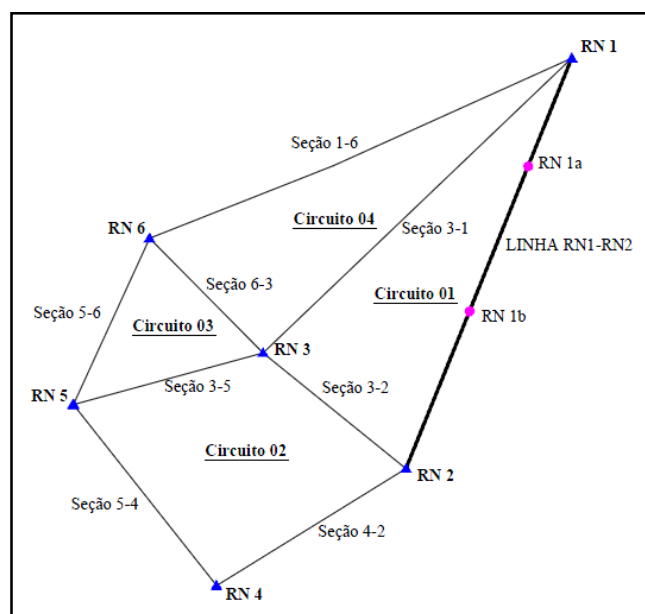


FONTE: A autora (2012)

As somas parciais dos desníveis, entre os pontos consecutivos, resultam no desnível entre as RRNN (ASIN, 1990).

Já a junção de várias seções forma uma linha, a junção das linhas um circuito e a associação dos circuitos forma uma rede de nivelamento (Figura 6).

FIGURA 6 - REDE, CIRCUITOS E LINHAS DE NIVELAMENTO

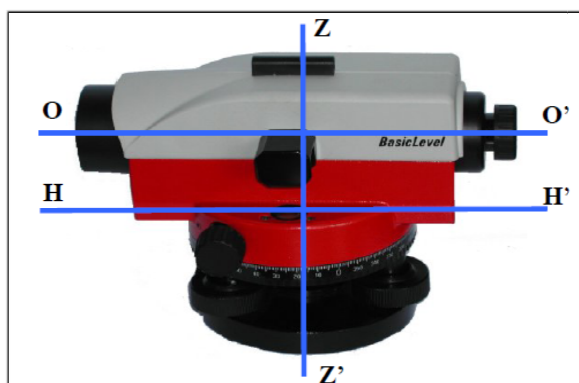


FONTE: A autora (2012)

2.4.2.1 Sistemas de eixos e fontes de erros no nivelamento geométrico

Assim como estações totais, teodolitos, os níveis também possuem eixos que devem satisfazer certas condições. Caso contrário, é possível inserir erros sistemáticos nos desníveis que está sendo determinado (Figura 7).

FIGURA 7 - PRINCIPAIS EIXOS DO NÍVEL



FONTE: VEIGA *et al.* (2007)

Na figura 7,

- ZZ': Eixo principal ou de rotação do nível;
- OO': eixo óptico ou eixo de colimação;
- HH': eixo do nível tubular ou tangente central.

As condições supracitadas são as seguintes:

- O eixo ZZ' deve estar na vertical;
- HH' deve estar na horizontal e ainda ortogonal ao eixo principal;
- OO' deve ser paralelo ao eixo HH'.

Todos os instrumentos, antes de sua utilização em campo devem ser verificados e se necessário retificados. Os principais erros encontrados em um nível são:

- Erro de verticalidade do eixo principal: acontece quando o eixo tubular HH' não está na horizontal, logo, o eixo principal do instrumento não coincide com a vertical. Esse tipo de erro impossibilita materializar a linha horizontal de visada (KAHMEN; FAIG, 1988).

▪ Erro de colimação: acontece quando a linha de visada não está paralela ao eixo óptico. Asin (1990) classifica este erro como erros próprios do nível. Esse erro pode ser determinado por um teste de nivelamento. Porém, quando se trata da aplicação do método de visadas iguais esse erro é minimizado como se pode observar nas equações 06 e 07:

$$\Delta H_{AB} = (L_{RÉ} + \varepsilon_R) - (L_{VANTE} + \varepsilon_V) \quad (06)$$

Sendo:

ΔH_{AB} : Desnível de A para B;

$L_{RÉ}$: leitura de ré;

ε_R : erro de colimação de ré;

L_{VANTE} : leitura de vante;

ε_V : erro de colimação de vante.

Como o erro de colimação de ré e vante são iguais, a diferença de nível de A para B é dada por:

$$\Delta H_{AB} = L_{RÉ} - L_{VANTE} \quad (07)$$

As miras utilizadas nos levantamentos também são fontes de erros no nivelamento caso certas condições não sejam cumpridas. Sendo assim, os erros oriundos do mau uso das miras e/ou problemas no próprio equipamento são:

▪ Erro de verticalidade da mira: acontece quando o nível esférico, situado na região posterior da mira, não está retificado e desta forma não garante a coincidência da mira com a vertical (KAHMEN; FAIG, 1988);

▪ Erro de índice da mira: determinado pela distância entre a base inferior da mira até a primeira graduação da escala da mesma. Segundo (D' ALGE, 1986), cada mira possui um valor de erro de índice próprio. Isso ocorre quando a escala de invar é colocada no corpo da mira, ocorrendo assim a não coincidência do zero da escala com a base da mira.

▪ Erro de graduação da mira: ocorre no momento da gravação da fita de invar em sua fabricação, ou devido às discrepâncias em seu comprimento decorridos pelo tempo e/ou pelo uso (JORDAN, 1981). Segundo Faggion (1993) as miras de invar devem ser periodicamente calibradas e ainda devem ser emitidos certificados de calibração.

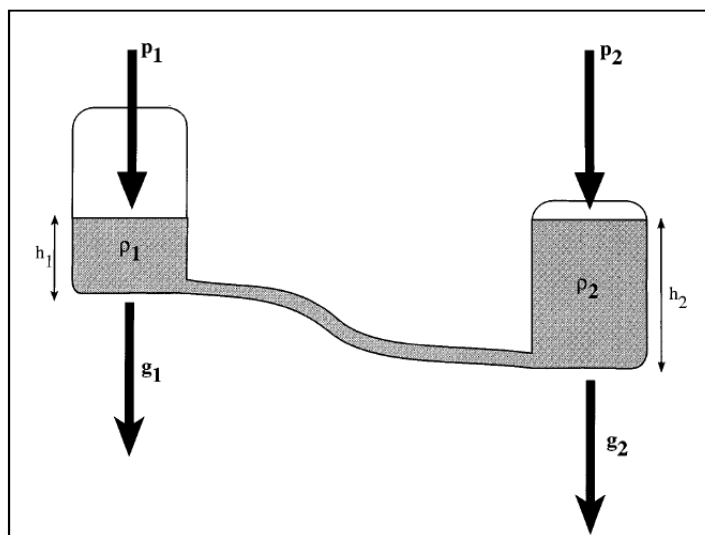
2.4.2.2 Nivelamento hidrostático

Para se obter o desnível entre dois pontos é utilizado também o nivelamento hidrostático.

Em topografia, o esse método também é conhecido como nivelamento com mangueira d'água (SANTOS, 2009).

Segundo Chrzanowski *et al.*(1999), quando dois recipientes conectados são parcialmente preenchidos com um mesmo líquido (Figura 8), então as alturas h_1 e h_2 estão relacionadas pela equação hidrostática de *Bernoulli* (Equação 08).

FIGURA 8 - EQUILÍBRIO HIDROSTÁTICO EM VASOS COMUNICANTES



FONTE: CHRZANOWSKI *et al.* (1999)

$$h_1 + \frac{P_1}{(g_1 \rho_1)} = h_2 + \frac{P_2}{(g_2 \rho_2)} = c \quad (08)$$

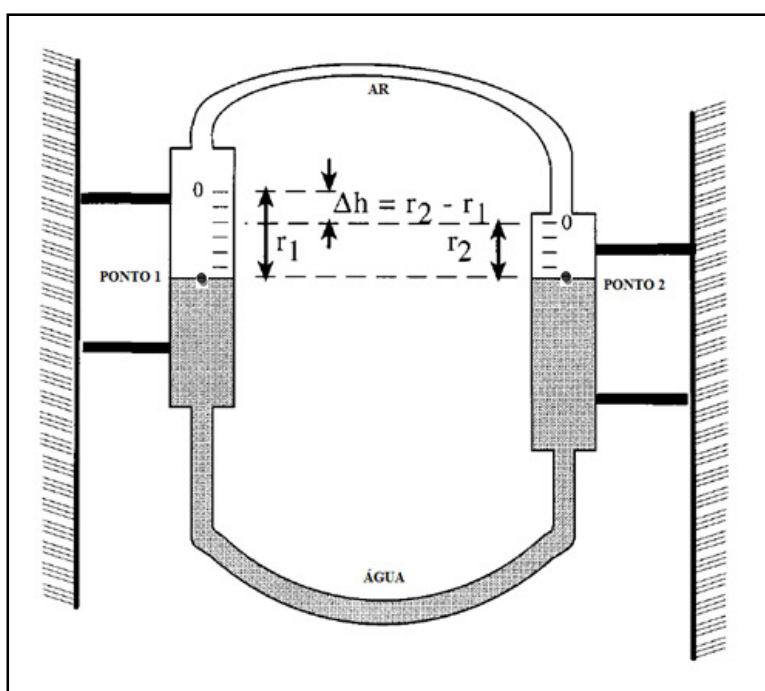
Sendo:

h : altura/ cota;

p : Pressão barométrica;
 g : aceleração da gravidade;
 ρ : densidade do líquido, que é em função da temperatura;
 c : constante.

A relação demonstrada pela equação 08 é empregada no nivelamento hidroestático, como é mostrado na figura 9.

FIGURA 9 - LEVANTAMENTO HIDROSTÁTICO



FONTE: ADAPTADO DE CHRZANOWSKI *et al.*(1999)

Onde:

Δh : Desnível entre os pontos 1 e 2;

r_1 : Cota do ponto 1;

r_2 : Cota do ponto 2.

O tubo de ar que liga os dois recipientes elimina erros possíveis, devido às diferentes pressões nas duas estações. Outro ponto importante é a conservação da temperatura do líquido constante, pois uma diferença de 1,2°C entre dois recipientes pode provocar um erro de 0,05 mm na determinação da diferença de nível para uma altura de 0,2 m e temperatura de 20°C (CHRZANOWSKI *et al.*1999). Em decorrência

desse tipo de erro, foi desenvolvido um *tiltmeter*⁴ de dois fluidos para superar o efeito da temperatura a partir de dois líquidos de diferentes densidades (HUGGETT⁵ *apud* CHRZANOWSKI, 1999).

Em uma discussão sobre nivelamento hidrostático, é enfatizado o cuidado que deve ser tomado para assegurar que não haja descontinuidade no líquido uma vez que a presença de qualquer gás pode introduzir um erro na diferença de nível na linha de líquido, especialmente em uma vertical, mais do que em uma parcela, horizontal da tubulação (DUNNICLIFF⁶ *apud* CHRZANOWSKI, 1999).

Ainda segundo Chrzanowski *et al.* (1999) o nivelamento hidrostático pode ser utilizado em monitoramento de estruturas de grande porte. Robotti e Rossini *apud* Chrzanowski (1999) relatam sobre um dispositivo de medição em um sistema de monitoramento de rede que oferece uma precisão de $\pm 0,01$ mm utilizando transdutores indutivos⁷ na medição de níveis líquidos.

2.4.3 Métodos indiretos

As estações totais surgiram com o desenvolvimento da microeletrônica aplicada ao instrumental utilizado em Topografia e Geodésia. São equipamentos precisos, leves, de manuseio prático e que, sobretudo, facilitam trabalhos de levantamento de campo. Sabe-se que o nivelamento geométrico é uma das técnicas mais aplicadas e precisas na determinação de movimentos verticais ou recalques em estruturas de grandes obras, porém se trata de um processo lento e consequentemente oneroso. Com isso um caminho é aberto para as alternativas baseadas nos métodos indiretos: o GNSS e nivelamento trigonométrico.

⁴ Equipamento usado na detecção de deslocamentos em relação ao nível horizontal.

⁵ G. R. Huggett, L. E. Slater, and G. Pavlis, ***Precision leveling with a two-fluid tiltmeter***, *Geophys. Res. Lett.*, 3(12), 754-756, 1976.

⁶ J F. Robotti and T. Rossini, ***Analysis of differential settlements on monumental structures by means of the DAG automatic measuring device of levels and inclinations***. In Land Subsidence, IAHA Publication N. 151, 1984.

⁷ Medidores de deslocamentos. É um dispositivo eletromecânico que produz uma saída elétrica proporcional ao deslocamento de um núcleo ferro-magnético móvel.

2.4.3.1 GNSS

O *NAVigation System with Time And Ranging/Global Positioning System* - NAVSTAR/GPS é um sistema de rádio-navegação, desenvolvido e realizado pelo *United States Department of Defense* e NASA (ANDRADE, 1988). O sistema obteve um rápido crescimento em aplicabilidade e popularidade no uso em posicionamento e em navegação. Logo, são inúmeras as aplicações do GNSS (*Global Navigation Satellite System*), dentre elas a geodinâmica; navegação global e regional; levantamentos geodésicos; estabelecimento de redes geodésicas locais, regionais, continentais e globais; agricultura de precisão; determinação altimétrica, assunto de nosso maior interesse neste trabalho, dentre outras (MONICO, 2008).

Com o GNSS determina-se altitudes e diferenças de nível de natureza geométrica (h), ao contrário dos outros métodos, onde o interesse são as altitudes ligadas ao campo da gravidade da Terra, nesse caso as altitudes ortométricas (H).

Na grande maioria dos trabalhos de posicionamento em obras de engenharia, levantamentos geodésicos e topográficos, faz-se necessária a determinação da altitude ortométrica (altitude referenciada ao geóide). Surge então a necessidade de transformar a altitude geométrica obtida no GPS, em altitude ortométrica (GEMAEL, 1999).

Essa transformação se faz conhecendo-se a altura geoidal. Mas, para se obter a altura geoidal (N) é necessário conhecer o geóide, que pode ser obtido por meio de modelos (MONICO, 2008).

Tem-se então que:

$$H \cong h - N \quad (09)$$

A equação 09 não possui solução analítica, pois se trata de diferentes sistemas de referência para H e h .

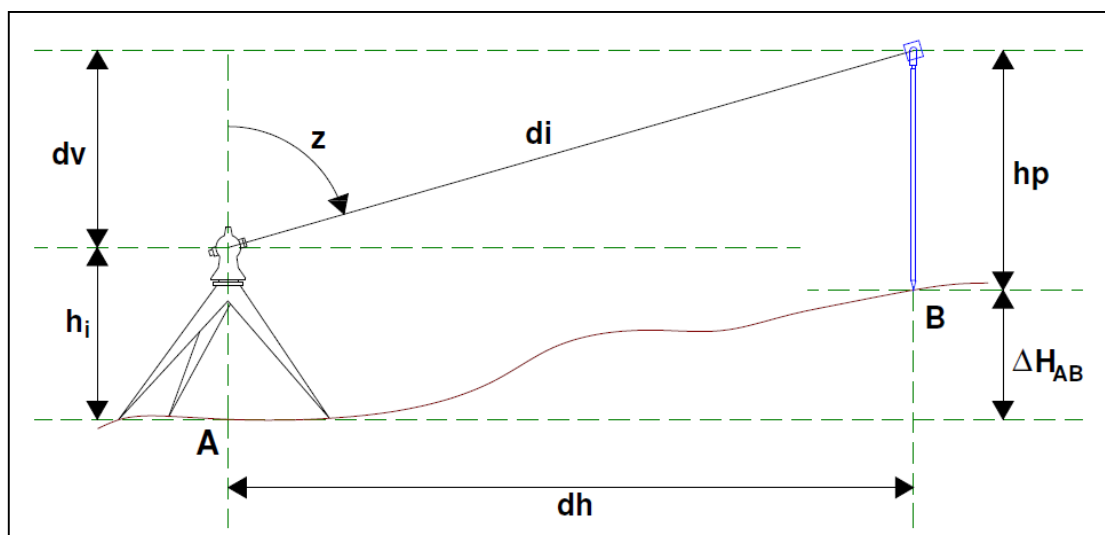
A partir dos dados GNSS é possível realizar o controle de recalque de fundações e de movimento de estruturas, controle geométrico de edificações, entre outros, porém não será explorado esse assunto, pois não se trata da proposta do presente trabalho. Aos interessados em mais informações a respeito sugere-se consulta em Seeber (1993), Torge (2001), Leick (2004), Monico (2008), entre outros.

2.4.3.2 Nivelamento trigonométrico

De maneira simples, o nivelamento trigonométrico baseia-se na resolução de um triângulo retângulo. Sendo então necessário coletar em campo, informações relativas à distância (horizontal ou inclinada), ângulos verticais (zenitais ou nadirais), além da altura do instrumento e do refletor.

De acordo com Wolf (2002) essa técnica trata-se de um método indireto para a determinação de desníveis entre dois pontos. Sua precisão é inferior comparada à obtida pelo nivelamento geométrico se aplicada de forma tradicional (Figura 10).

FIGURA 10 - OBTENÇÃO DO DESNÍVEL



FONTE: A Autora (2012)

Na partir da figura 10, tem-se que:

d_i : distância inclinada;

d_h : distância horizontal;

d_v : distância vertical entre o centro ótico do equipamento e o plano horizontal que passa o centro do alvo;

z : ângulo zenital de A para B;

h_i : altura do instrumento;

h_p : altura do alvo ou prisma refletor;

ΔH_{AB} : desnível de A para B.

Para determinar o desnível de A para B, por trigonometria (KAHMEN; FAIG, 1988), a distância d_i , o ângulo zenital Z_{AB} , a altura do instrumento h_i e a altura do

alvo h_p devem ser medidos. Modernamente, as medidas de Z_{AB} e d_i são realizadas com uma estação total e estão referenciadas ao ponto de referência do instrumento (a interseção dos eixos secundário, óptico e vertical) e direcionadas ao ponto onde é efetuada a pontaria. A partir das equações⁸ a seguir determina-se o desnível entre A e B.

$$h_i + d_v = \Delta H_{AB} + h_p \quad (10)$$

Isolando ΔH_{AB} na equação 10:

$$\Delta H_{AB} = h_i + d_v - h_p \quad (11)$$

Observando a figura 12 e a partir de uma relação trigonométrica tem-se que:

$$d_v = d_i \cos(Z) \quad (12)$$

E por fim, substituindo (12) em (11) o desnível ΔH_{AB} é dado pela equação 13 que é aplicável para nivelamentos com pequenas distâncias (até 100m entre a estação total e o alvo), considerando o plano como referência não levando em conta a curvatura da Terra e o efeito da refração no ângulo zenital.

$$\Delta H_{AB} = d_i \cos(Z) + h_i - h_p \quad (13)$$

Ficam evidenciadas então duas situações: o nivelamento trigonométrico para lances curtos e para lances longos.

Para o último caso, presente nessa pesquisa, deve-se levar em consideração a influência da curvatura da Terra e da refração atmosférica. A expressão utilizada neste caso é a mesma que foi apresentada no item anterior, porém com a inclusão de um termo referente à correção relativa à curvatura da Terra e refração atmosférica (GOMES, 2006).

⁸ As variáveis dessas equações já foram descritas na da figura 10.

Associando essa correção⁹ à equação 13, resulta na seguinte relação (Equação 14):

$$\Delta H_{AB} = d_i \cos Z + h_i - h_p + (D_h^2 / 2R) \cdot (1 - k) \quad (14)$$

Onde:

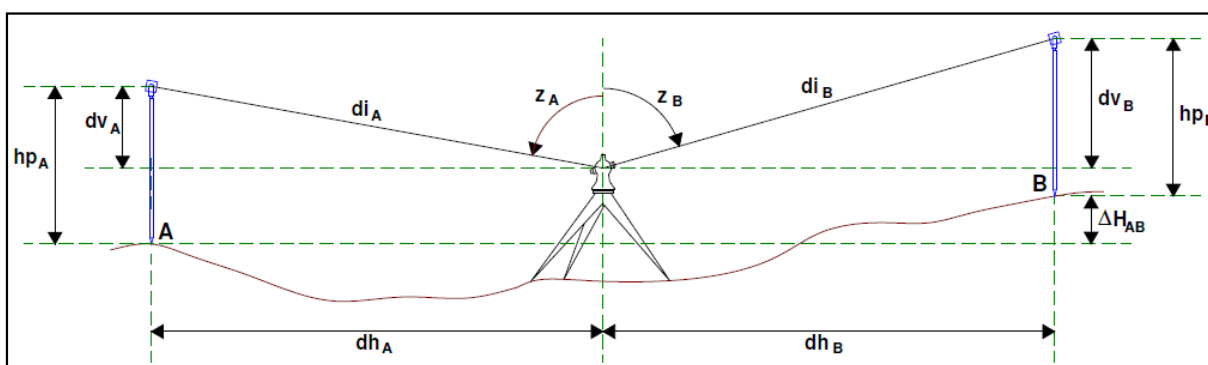
R : raio aproximado da Terra que pode ser tomado como 6.400 km;

k : variável relacionada com a refração atmosférica para cada região, época do ano e para os turnos do dia. No Brasil é utilizado o coeficiente médio $K = 0,13$.

2.4.3.2.1 Técnica *Leap-Frog*

Essa técnica consiste em instalar a estação total entre os dois pontos dos quais se deseja obter o desnível, ao invés de colocá-la sobre um deles. Sobre esses pontos são instalados dois bastões com prismas refletores, que serão visados para obtenção das distâncias inclinadas e dos ângulos zenitais de ré e de vante (Figura 11). Esse procedimento faz com que a medida da altura do instrumento não seja necessária (KAHMEN; FAIG, 1988).

FIGURA 11 - TÉCNICA LEAP-FROG



FONTE: A Autora (2012)

⁹ Maiores detalhes dessa correção serão discutidos na Seção 2.5.

Na figura 11:

dv_A : Distância vertical entre o centro ótico do equipamento e o centro do alvo em A;

dv_B : distância vertical entre o centro ótico do equipamento e o centro do alvo em B;

hp_A : altura do alvo em A;

hp_B : altura do alvo em B;

di_A : distância inclinada entre a estação e o alvo A;

di_B : distância inclinada entre a estação e o alvo B;

dh_A : distância horizontal entre a estação e o alvo A;

dh_B : distância horizontal entre a estação e o alvo B;

Z_A : ângulo zenital da Estação para o alvo A;

Z_B : ângulo zenital da Estação para o alvo B;

ΔH_{AB} : desnível de A para B.

A partir da figura 11 é verificado que:

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = hp_A - dv_A + dv_B - hp_B \quad (15)$$

Evidenciando as grandezas dv_A e dv_B em função dos parâmetros medidos em campo:

$$dv_A = di_A \cos (Z_A) \quad (16)$$

$$dv_B = di_B \cos (Z_B) \quad (17)$$

A fim de minimizar os efeitos de curvatura terrestre e refração atmosférica, a estação total deve ser instalada na distância equivalente entre os pontos de ré e de vante. No entanto, à medida que a diferença da visada de ré e vante aumenta é

necessário aplicar a correção da curvatura e refração atmosférica conforme pode ser observado na equação 14 (KAHMEN; FAIG, 1988).

Segundo Chrzanowski (1989), a *University of New Brunswick* no Canadá testou uma variação deste método com bastões projetados com altura de até 5 m e 3 ou 4 alvos dispostos em alturas diferentes. Foi alcançada uma acurácia da ordem de $2 \text{ mm}\sqrt{k}$ com distância de visadas de 300 m.

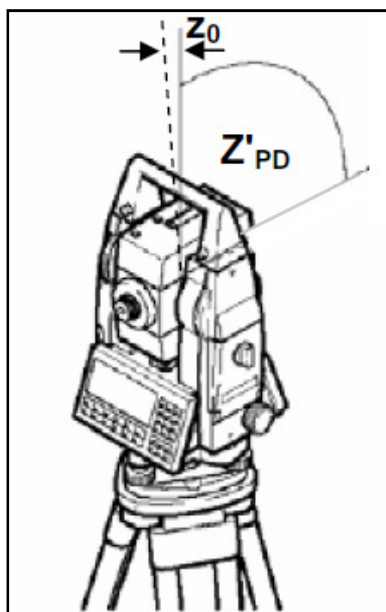
2.4.3.3 Erros instrumentais no nivelamento trigonométrico

Segundo Kahmen; Faig (1988), os erros instrumentais são naturais da própria fase de fabricação dos equipamentos, ou originados pelo desgaste e ainda pela falta de manutenção depois de um longo tempo de uso.

Para as estações totais, como também para os teodolitos, os principais erros instrumentais são: erro de verticalidade do eixo principal, a não ortogonalidade entre o eixo de colimação e o eixo secundário, a não ortogonalidade entre o eixo principal e o eixo secundário, erro de zênite instrumental e erro de gravação do limbo.

O erro de verticalidade do eixo principal ocorre quando o eixo principal do teodolito ou estação total não coincide com a vertical do lugar que passa pelo centro do equipamento. Este erro está diretamente ligado à operação de nivelamento do instrumento e não é eliminado realizando observações nas posições direta e inversa da luneta. Para minimizá-lo, é necessária a retificação dos níveis de bolha de calagem. No caso das estações totais, estas dispõem de compensadores eletrônicos, que permitem a correção automática deste erro, sendo necessária uma calibração periódica do compensador, a qual normalmente pode ser realizada através de procedimentos descritos nos manuais dos equipamentos (KAHMEN; FAIG, 1988).

Na medição do ângulo zenital, o erro de zênite instrumental ocorre quando o zero da escala não coincide com o zênite (Figura 12).

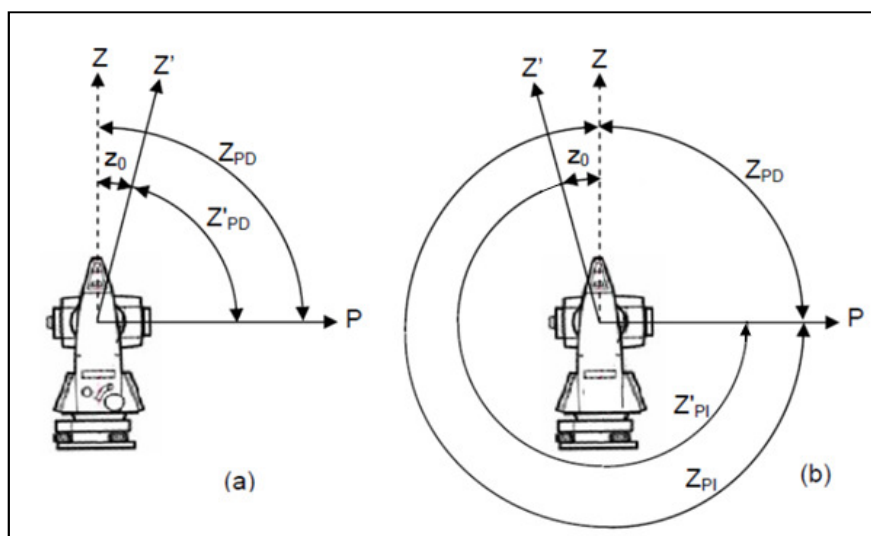
FIGURA 12 - ERRO DE ZÊNITE INSTRUMENTAL (Z_0)

FONTE: ADAPTADO DE ZEISKE (sd)

Sendo z_0 o erro de zênite e Z'_{PD} a leitura do ângulo zenital em posição direta eivada de erro.

Este erro é eliminado realizando observações nas posições direta e inversa da luneta (Figura 13). Para sua determinação é necessário instalar o teodolito ou estação total em uma posição que seja possível observar um alvo bem definido e realizar pontarias, sobre este alvo, em posição direta e invertida da luneta (WOLF, 2002).

FIGURA 13 - LEITURAS DO ÂNGULO ZENITAL EM PD E PI



FONTE: GOMES (2006)

Da figura 13(a)(b), obtém-se:

$$Z_{PD} = Z'_{PD} + z_0 \quad (18)$$

Onde:

Z_{PD} : Ângulo zenital em posição direta isenta de erro;

Z'_{PD} : ângulo zenital em posição direta eivada de erro;

z_0 : erro de zênite instrumental.

Em seguida deve-se repetir a pontaria no mesmo ponto na posição invertida (PI), resultando na leitura do ângulo vertical Z'_{PI} (Figura 13(b)).

$$Z_{PD} = 360^\circ - Z'_{PI} - z_0 \quad (19)$$

Z'_{PI} : Ângulo zenital em posição indireta eivada de erro.

Fazendo a subtração da equação 19 pela equação 18 é obtido o valor do erro de zênite:

$$z_0 = \frac{360^\circ - (Z'_{PI} + Z'_{PD})}{2} \quad (20)$$

Para determinar o ângulo zenital isento de erro (Z) emprega-se a seguinte relação (Equação 21):

$$Z = \frac{Z'_{PD} - Z'_{PI}}{2} \pm 180^\circ \quad (21)$$

Obs.: Soma-se 180° quando Z'_{PD} for menor que Z'_{PI} .

2.5 EFEITO DA REFRAÇÃO E CURVATURA TERRESTRE

Como já foi dito, para casos de nivelamentos trigonométricos para lances longos, o efeito da refração e curvatura terrestre devem ser tratados com atenção. Em decorrência disso, serão discutidos com maiores detalhes.

2.5.1 Efeito da refração na determinação do desnível

O efeito da refração (C_r) é dado pela seguinte equação (KAHMEN; FAIG 1988):

$$C_r = \frac{k \cdot D_h^2}{2R} \quad (29)$$

Onde:

D_h : distância horizontal entre os pontos em metros;

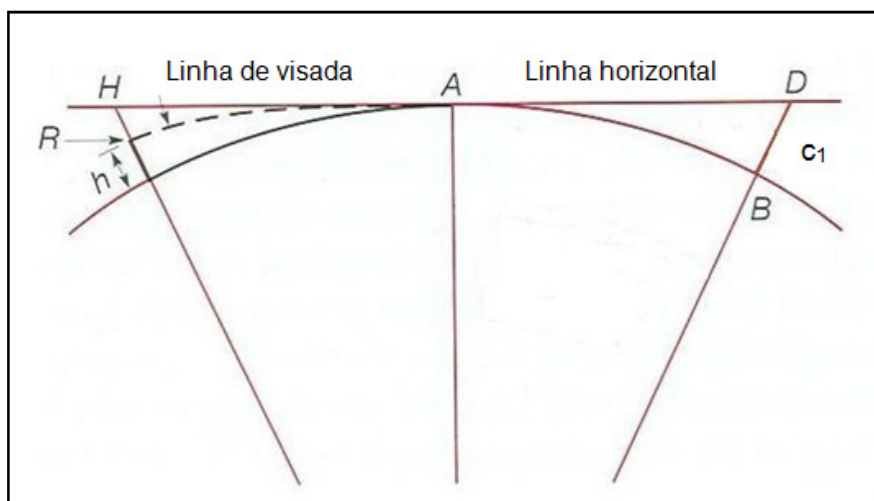
R : raio da Terra em metros;

k : coeficiente de refração. No Brasil adota-se o valor de 0,13.

2.5.2 Curvatura terrestre na determinação do desnível

Na figura 14 é possível observar que BD refere-se ao efeito de curvatura em uma leitura feita a partir de A para o ponto D. Já para a linha de visada AR, é então diminuído da leitura o termo RH referente ao efeito de refração¹⁰. Sendo assim, a combinação de ambos os efeitos é dada por h.

FIGURA 14 - EFEITO DA CURVATURA TERRESTRE E REFRAÇÃO



FONTE: ADAPTADO DE WOLF (2002)

¹⁰ O efeito de refração será abordado com maiores detalhes na Seção 2.5.1.

O efeito da curvatura c_1 é determinado pela equação 22 (KAHMEN; FAIG, 1988).

$$c_1 = \frac{D_h^2}{2R} \quad (22)$$

Onde:

c_1 : Efeito da curvatura;

D_h : distância horizontal entre os pontos em metros;

R : raio médio da Terra.

Pode-se observar os valores de correção da curvatura calculados para algumas distancias definidas, segundo a tabela 2.

TABELA 2 - CORREÇÃO DA CURVATURA TERRESTRE

Distância	100 m	200 m	500 m	1000 m	5 km	10 km
c_1	0,8 mm	3,2 mm	2,0 mm	7,9 cm	1,96 m	7,9 m

FONTE: ADAPTADO DE KAHMEN; FAIG (1988)

Aplicando os efeitos da curvatura terrestre e refração, para o cálculo do desnível entre A e B obtém-se a equação 14, seção 2.4.3.2, p.42.

2.5.3 Índice de refração

O índice de refração da fase de uma onda eletromagnética passando por um meio homogêneo e anisotrópico¹¹ é determinado por:

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (23)$$

Onde:

n : Índice de refração da fase;

c_0 : velocidade de fase da onda no vácuo;

c : velocidade de fase da onda no meio.

¹¹ Que apresenta propriedades (como a velocidade de transmissão da luz, a condutividade de calor ou eletricidade, compressibilidade), com valores diferentes.

Segundo Schaal (1995) a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas na atmosfera próxima à superfície depende de 5 parâmetros:

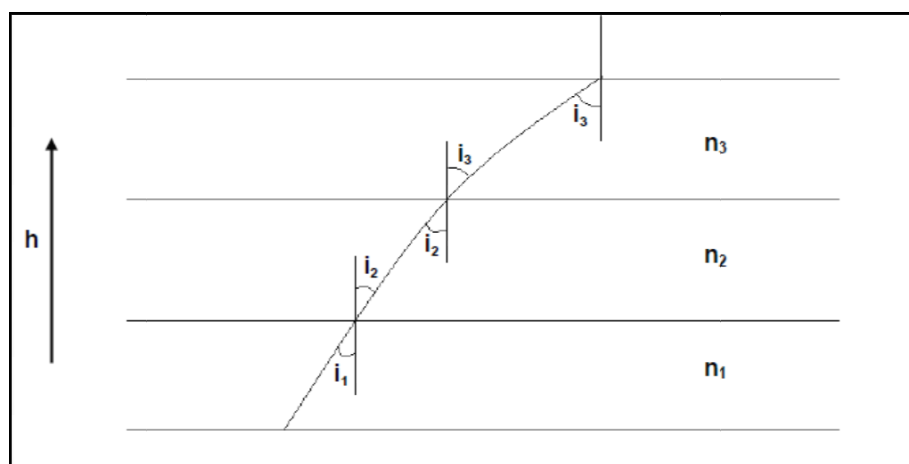
- Temperatura do ar.
- Pressão total.
- Composição da mistura gasosa do ar.
- Pressão parcial do vapor d'água.
- Comprimento da onda eletromagnética.

No momento em que uma onda eletromagnética passa por uma região de diferentes índices de refração, a trajetória da frente de onda se desvia da linha reta. Isso acontece devido às diferentes velocidades ao longo da frente da onda (SCHAAL, 1995).

O índice de refração é variável na direção vertical graças à variação de densidade do ar sob ação da gravidade.

Em uma atmosfera idealizada, somente sob ação da gravidade, o caminhamento da onda luminosa apresenta uma curvatura convexa quando ocorre variação crescente do ângulo i de incidência i_j na direção da vertical ascendente (Figura 15).

FIGURA 15 - PERCURSO DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA NA ATMOSFERA IDEAL.



FONTE: DODSON E ZAHER (1985)

Observando a figura 15 é possível obter a seguinte relação:

$$i_3 > i_2 > i_1 \quad (24)$$

A Lei básica da refração, conhecida como Lei de Snell é dada pela seguinte igualdade:

$$n_j \cdot \sin i_j = \text{constante} \quad (25)$$

Com:

n_j : índice de refração da camada j ;

i_j : ângulo de incidência da camada j .

Então, de acordo com as igualdades 24 e 25 supracitadas, chega-se a seguinte relação:

$$n_3 < n_2 < n_1 \quad (26)$$

Da relação 26, tem-se que o gradiente vertical do índice de refração $\left(\frac{\partial n}{\partial h}\right)$ é negativo. A curvatura convexa do raio luminoso é caracterizada pelo gradiente vertical negativo do índice de refração.

Segundo Schaal (1995), o raio de curvatura do percurso da onda luminosa ou da linha de visada, possui sua amplitude e direção em função da amplitude e do sentido do gradiente vertical do índice de refração do ar.

DODSON e ZAHER (1985) desenvolveram alguns cálculos e afirmaram que o gradiente do índice de refração é proporcional ao gradiente da temperatura do ar $\left(\frac{\partial T}{\partial h}\right)$. Esse desenvolvimento não será explorado nesse trabalho, portanto aos interessados, fica a sugestão de consulta: Dodson e Zaher (1985), Schaal (1995).

De acordo com Schaal (1995) o parâmetro que quantifica a curvatura da trajetória da onda eletromagnética na atmosfera da Terra é conhecido como o coeficiente de refração.

2.5.4 Cálculo do Coeficiente de Refração (k)

Conhecendo a distância entre dois pontos, bem como o desnível com precisão e isolando-se k equação 14, seção 2.4.3.3, p. 43 obtém-se:

$$k = \frac{2R}{D_h^2} (-\Delta h_{AB} + d_i \cos Z_{AB} - h_i + h_p) + 1 \quad (27)$$

Sendo:

k : Coeficiente de refração;

R : raio aproximado da Terra que pode ser tomado como 6.400 km;

D_h : distância horizontal entre os marcos, em quilômetros;

Δh_{AB} : desnível entre os pontos A e B em metros;

d_i : distância inclinada em metros;

Z_{AB} : ângulo zenital de A para B;

h_i : altura do instrumento em metros;

h_p : altura do alvo ou prisma refletor em metros.

Segundo Kahmen; Faig (1988) outra forma de determinar k, consiste em observar ângulos zenitais recíprocos e simultâneos entre dois pontos com distância conhecida.

$$k = 1 - \left(\frac{Z_{12} + Z_{21} - 180^\circ}{180^\circ/\pi} \cdot \frac{R}{D_h} \right) \quad (28)$$

Com:

k : Coeficiente de refração;

Z_{12} : ângulo zenital de 1 para 2;

Z_{21} : ângulo zenital de 2 para 1;

R : raio aproximado da Terra que pode ser tomado como 6.400 km;

D_h : distância horizontal entre os pontos (em km).

Aos interessados, a dedução da equação 28 encontra-se disponível em Kahmen; Faig, 1988.

Muitos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos com o objetivo de determinar a influência da refração na distância obtida a partir dos MEDs – Medidores Eletrônicos de Distâncias, entretanto há pouca referência na literatura quando se trata dessa influência na obtenção do ângulo zenital.

O efeito da refração no ângulo zenital é usualmente calculado a partir de um modelo adiabático da atmosfera real. Modelo este que representa o estado da atmosfera numa média para todas as latitudes e estações do ano. Esse modelo apresenta valores fixos da temperatura e pressão do ar ao nível do mar e perfis verticais fixos de temperatura e pressão. Nas determinações de desníveis utilizando nivelamento trigonométrico aplica-se a correção simultânea da curvatura da Terra e da refração atmosférica (KHARAGHANI, 1987).

Nos trabalhos desenvolvidos na micrometeorologia¹², modelos de transferência de turbulência têm sido pesquisados para descrever os processos que conduzem o gradiente de temperatura na baixa atmosfera (KHARAGHANI, 1987).

Em Schaal (1995) são apresentados modelos de turbulência para determinação da influência da refração nos ângulos zenitais em medições próximas ao solo.

É concluído que em um gradiente de temperatura maior que $-0,034\text{ }^{\circ}\text{C/m}$, acarreta a curvatura de visada sempre convexa e menor que $-0,034\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ acarreta assim uma curvatura de visada sempre côncava.

$$\frac{\partial T}{\partial h} > -0,0342\text{ }^{\circ}\text{C/m} \quad \Rightarrow \quad \text{Curvatura convexa}$$

$$\frac{\partial T}{\partial h} < -0,0342\text{ }^{\circ}\text{C/m} \quad \Rightarrow \quad \text{Curvatura côncava}$$

Essa relação foi concluída utilizando dados da atmosfera padrão. Tem-se ainda em Dodson; Zaher (1985) outra teoria chegando aos mesmos resultados.

¹² Ramo da meteorologia que trata das interações superfície-atmosfera, estabilidade atmosférica e fluxos de calor e massas.

Para o coeficiente de refração $k = 0,13$, obtido segundo um modelo da atmosfera padrão, resulta, segundo (SCHAAL, 1995) em um gradiente de:

$$\frac{\partial T}{\partial h} > -0,012 \text{ } ^\circ\text{C}/m$$

Portanto resulta-se em um gradiente de temperatura maior do que $-0,034 \text{ } ^\circ\text{C}$, acarretando assim uma curvatura de visada sempre convexa.

Essa curvatura ocasiona uma subtração no desnível determinado por nivelamento trigonométrico. Esta conclusão é confirmada ao se analisar a equação 14, seção 2.4.3.2, p. 42 onde, para $k = 0,13$, a correção do efeito da refração (subtrativa) representa 13% do efeito da curvatura terrestre (KHARAGHANI, 1987).

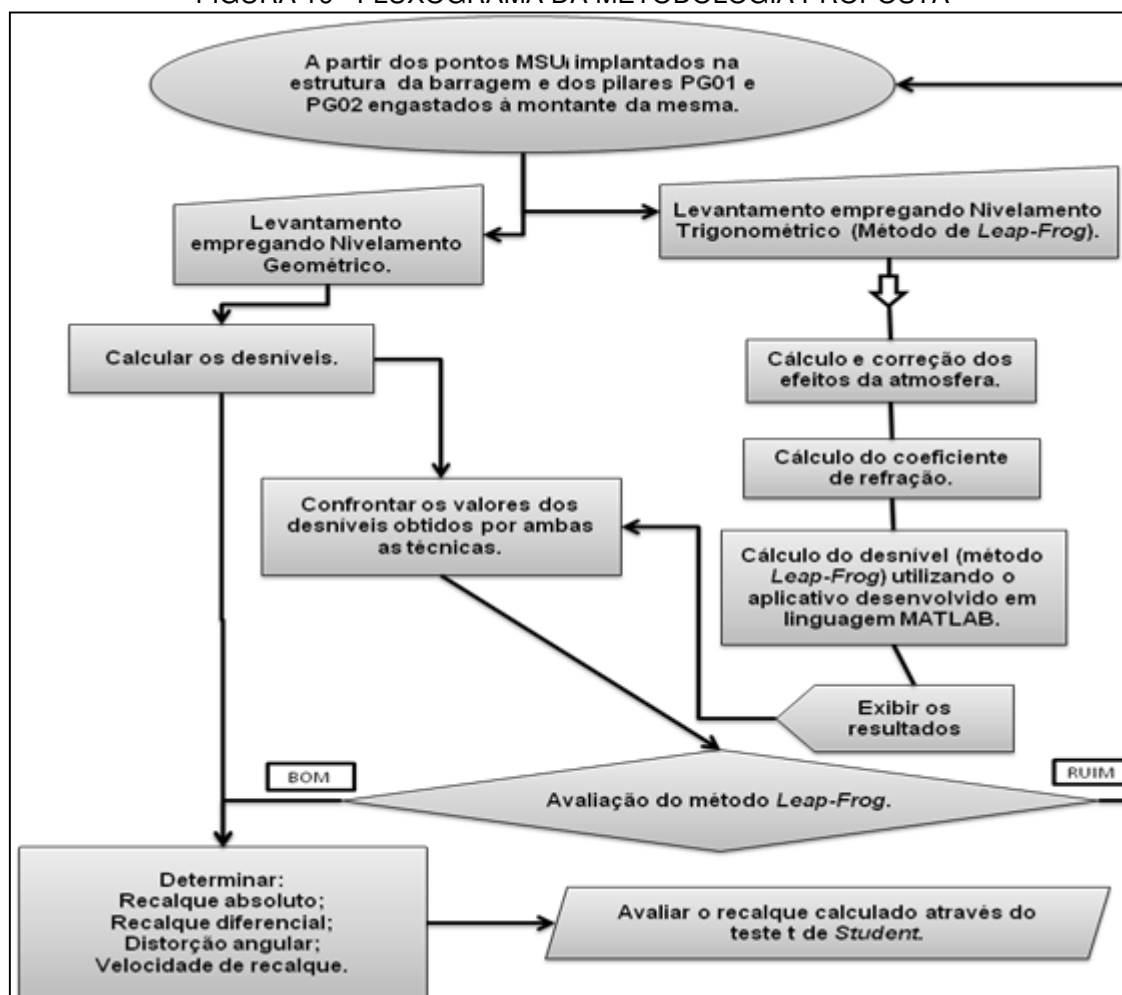
3 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo será realizada uma descrição da área em estudo e os desenvolvimentos necessários para a determinação do desnível utilizando nivelamento geométrico e nivelamento trigonométrico, técnica *Leap-Frog*.

3.1 EXPERIMENTOS REALIZADOS

A metodologia que será utilizada neste trabalho é apresentada através do fluxograma que se segue (Figura 16).

FIGURA 16 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA



FONTE: A autora (2012)

3.2 DESCRIÇÃO DA UHE MAUÁ

Segundo o Consórcio Energético Cruzeiro do Sul (2011) a UHE Mauá é composta de uma barragem de CCR de aproximadamente 85 m de altura máxima, 745 m de comprimento de crista, com 361 MW de potência instalada e um volume total do reservatório de aproximadamente $6,3 \times 10^5 \text{ m}^3$. O trabalho de construção da barragem no Rio Tibagi, iniciado em agosto de 2009, teve duração de 19 meses incluindo o período de ensecamento e preparação do leito do rio e da Marge (Figura 17).

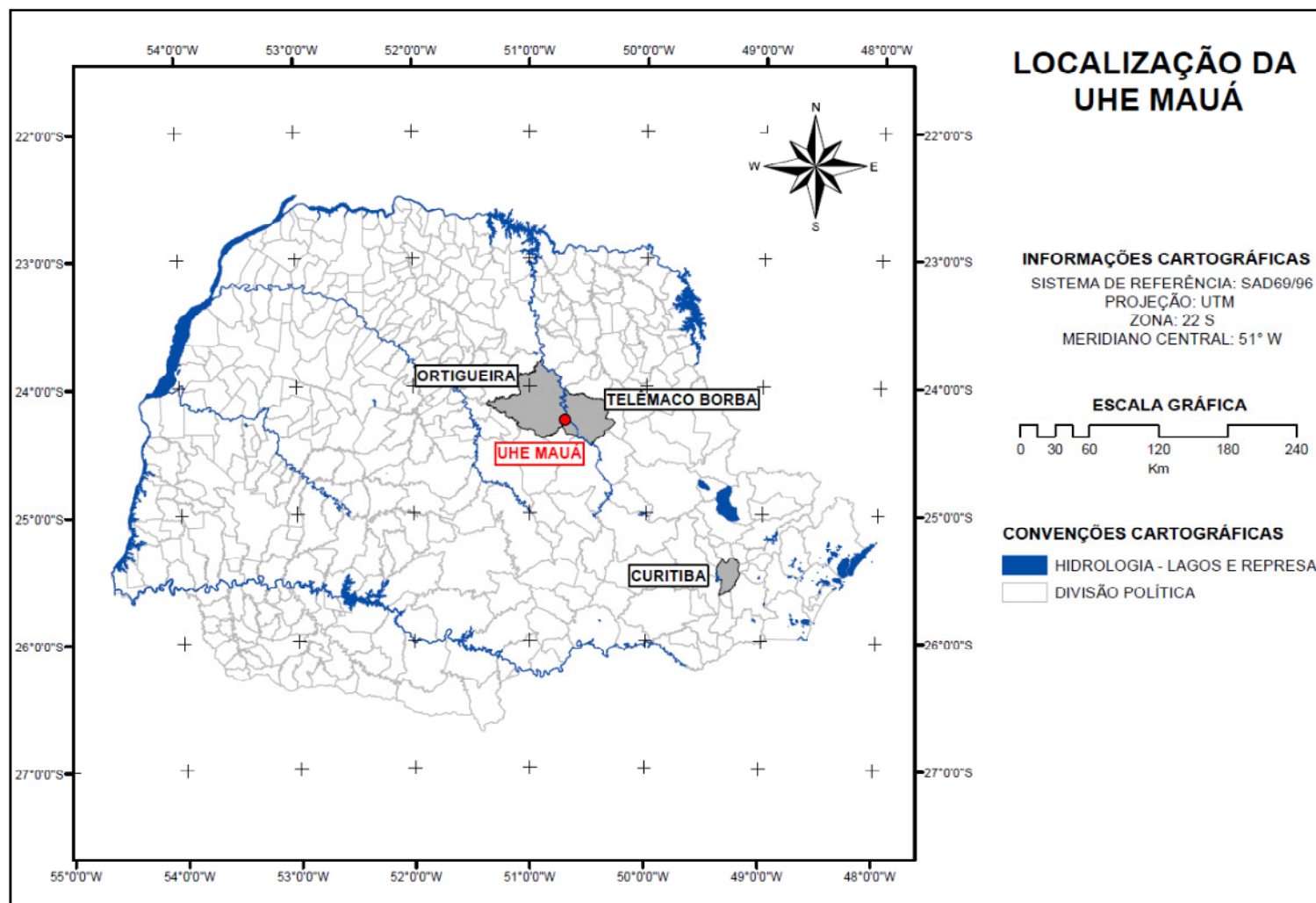
FIGURA 17 - LANÇAMENTO DE CCR PELO MÉTODO RAMPADO



FONTE: CONSÓRCIO ENERGÉTICO CRUZEIRO DO SUL (2011)

Ela está situada no rio Tibagi, entre os municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira, a aproximadamente 280 km da capital Curitiba (Figura 18).

FIGURA 18 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DA UHE MAUÁ



FONTE: A autora (2011)

No trecho central da estrutura em questão foi construído um vertedouro com quatro vãos controlados por comportas tipo setor com 11,4 m de largura por 17 m de altura (DUARTE, *et al.* 2011).

FIGURA 19 - VISTA À MONTADE DA BARRAGEM



FONTE: A autora (2012)

Vale à pena ressaltar o tipo de solo da região da usina. Do ponto de vista geotécnico, se trata do primeiro aproveitamento hidrelétrico de grande porte no estado do Paraná a ser implantado no domínio das rochas sedimentares do segundo planalto paranaense (LAME, 2007). As usinas do rio Jordão, assim como as usinas do rio Iguaçu e até mesmo a própria usina de Itaipu foram implantadas em geologia de rochas basálticas da bacia do Paraná. Essas usinas possuem um ponto em comum: o fato de terem sido implantadas em geologias constituídas por rochas ígneas densas, ou seja, com alta resistência mecânica e, portanto, mais favoráveis em termos geotécnicos. Já as rochas sedimentares, predominantes na região de Mauá requerem cuidados especiais em função de sua menor resistência mecânica e maior porosidade, portanto, com menor densidade e maior sensibilidade a processos de degradação à exposição ao intemperismo ou à ação hidráulica (DUARTE, *et al.* 2011).

A barragem está fundada sobre uma soleira de diabásio¹³ cuja profundidade sobre a camada subjacente de siltito é crescente de montante para jusante e decrescente da ombreira direita para o leito do rio. Na lateral esquerda da calha do rio os blocos 27, 28, 29 e 30 da barragem possui sua fundação em siltito que afloram lateralmente ao contato de um dique alimentador posicionado na calha do rio. Ao longo do eixo da barragem a cobertura de diabásio é de cerca de 25 m sobre os túneis de desvio, caindo para 15m aproximadamente no canal do rio (bloco 24) e 3 a 4m no bloco 31, aumentando novamente na direção da ombreira esquerda (DUARTE, *et al.* 2011).

FIGURA 20 - CONTATO GEOLÓGICO NA PAREDE DO TÚNEL DE DESVIO COM O SILTITO (CLARO) MERGULHANDO SOB O DIABÁSIO (ESCURO)



FONTE: (DUARTE, *et al.* 2010)

3.3 BENCHMARKS

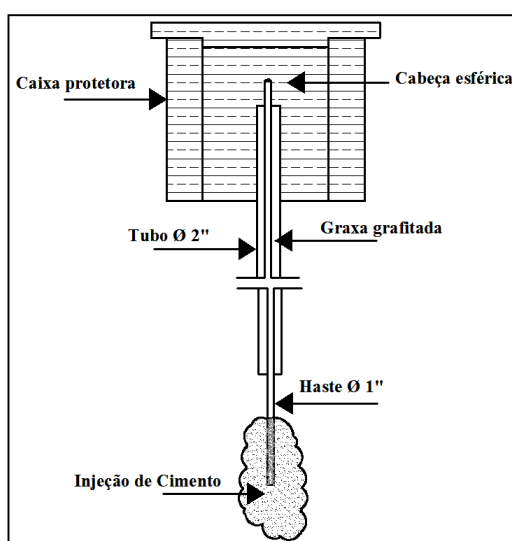
Para verificar os possíveis deslocamentos verticais sucedidos na barragem em estudo foi necessária a adoção de pontos teoricamente fixos que atuam como referência de nível para as observações que foram feitas. Em obras de grande porte,

¹³ Trata-se de uma rocha ígnea intrusiva de coloração cinza-escura a preta, estrutura maciça e granulação fina. Ocorre geralmente na forma de diques ou soleiras (GIACOMINI, 2009).

como é o caso da UHE Mauá, é preconizado a construção de uma referência de nível profunda – RNP. Também conhecidos como *benchmarks*, as RNP são, portanto, pontos fixos e irrecalcáveis empregados no controle de recalques (PETROBRAS, 2005).

Para garantir esta propriedade o *benchmark* deve ser instalado em local que não sofra a influência da própria obra ou outras causas que comprometam sua estabilidade.

FIGURA 21 - CONSTRUÇÃO DO BENCHMARK



FONTE: ADAPTADO DE PETROBRAS (2005)

Para a UHE Mauá foram implantados quatro pilares, sendo dois à montante e dois à jusante da barragem. Na figura 22 é ilustrado um dos pilares de referência (PG01) instalado de forma a não sofrer influência da própria obra ou outras causas que possam comprometer sua estabilidade. Esses pilares assumem o papel de um *benchmark* para o monitoramento da estrutura em questão.

FIGURA 22 - PG01 SOBRE UM AFLORAMENTO ROCHOSO



FONTE: A Autora (2012)

Para o controle de recalque serão utilizados os dois pilares à montante (PG 01 e PG02) e as RRNN implantadas sobre o corpo da barragem espaçadas por 50 m uma da outra denominadas de MSU_i^{14} .

3.4 MÉTODOS APLICADOS NOS LEVANTAMENTOS

Para este trabalho foram aplicados os métodos direto e indireto para a determinação de recalque, durante as 04 (quatro) campanhas.

O método direto adotado foi o nivelamento geométrico, com um erro de fechamento admissível para as seções de $1\text{mm}\sqrt{k}$ (k refere-se à média das distâncias nivelada e contra-nivelada). Além disso, foram determinadas 19 seções de nivelamento entre os pilares PG01 e PG02 (Quadro 2). Na estrutura do pilar PG01 existe uma chapa metálica denominada de RN 5, que também foi utilizada para a conexão dos pilares.

¹⁴ Com $1 < i < 17$.

QUADRO 2 - SEÇÕES DE NIVELAMENTOS

PG01 – RN 5	MSU 09 – MSU 10
RN 5 – MSU 01	MSU 10 – MSU 11
MSU 01 – MSU 02	MSU 11 – MSU 12
MSU 02 – MSU 03	MSU 12 – MSU 13
MSU 03 – MSU 04	MSU 13 – MSU 14
MSU 04 – MSU 05	MSU 14 – MSU 15
MSU 05 – MSU 06	MSU 15 – MSU 16
MSU 06 – MSU 07	MSU 16 – MSU 17
MSU 07 – MSU 08	MSU17 – PG02
MSU 08 – MSU 09	

FIGURA 23 - PILAR À DIREITA DA MARGEM (PG01) COM A CHAPA AFIXADA À BASE DA PLATAFORMA (RN-5)



FONTE: A autora (2012)

As figuras 24-a, 26-b, 26-c, 26-d, 24-e e 24-f ilustram como foi executado o nivelamento a partir do pilar PG01.

A figura 24-a apresenta o início do trabalho de nivelamento com a determinação do desnível entre o pilar PG01 e a RN-5.

Na figura 24-b inicia-se a determinação do nivelamento da seção ente a RN05 e o MSU01 e nas demais figuras é apresentado o caminhamento.

FIGURA 24 - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO A PARTIR DO PG01

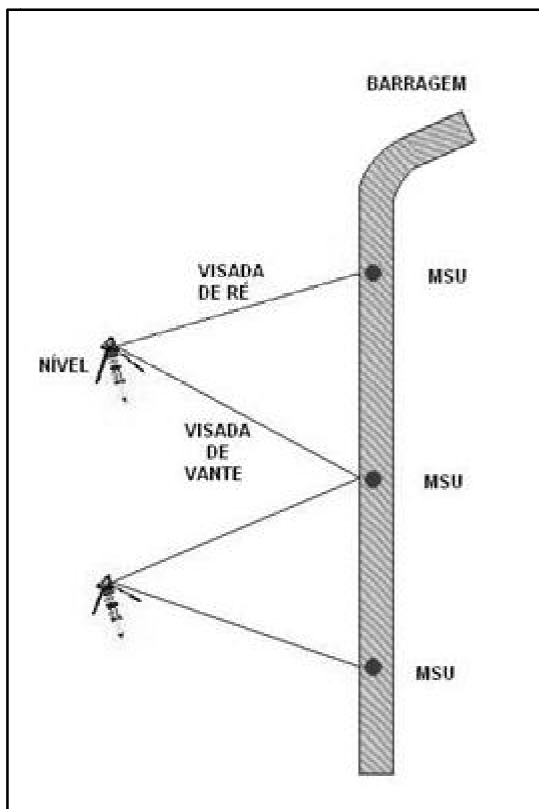


FONTE: A autora (2012)

Além da RN-5, foram utilizados os 17 pinos de monitoramento (MSU_i) localizados na mureta da barragem, na face a montante. A nomenclatura que a Copel (Companhia Paranaense de Energia) definiu foi mantida.

A fim de minimizar os erros de colimação vertical do nível, de curvatura e refração foi aplicado o método de visadas iguais (Figura 25). O nível foi instalado a igual distância de MSU1-MSU2, MSU2-MSU3 e assim sucessivamente, respeitando uma tolerância máxima de 2 m.

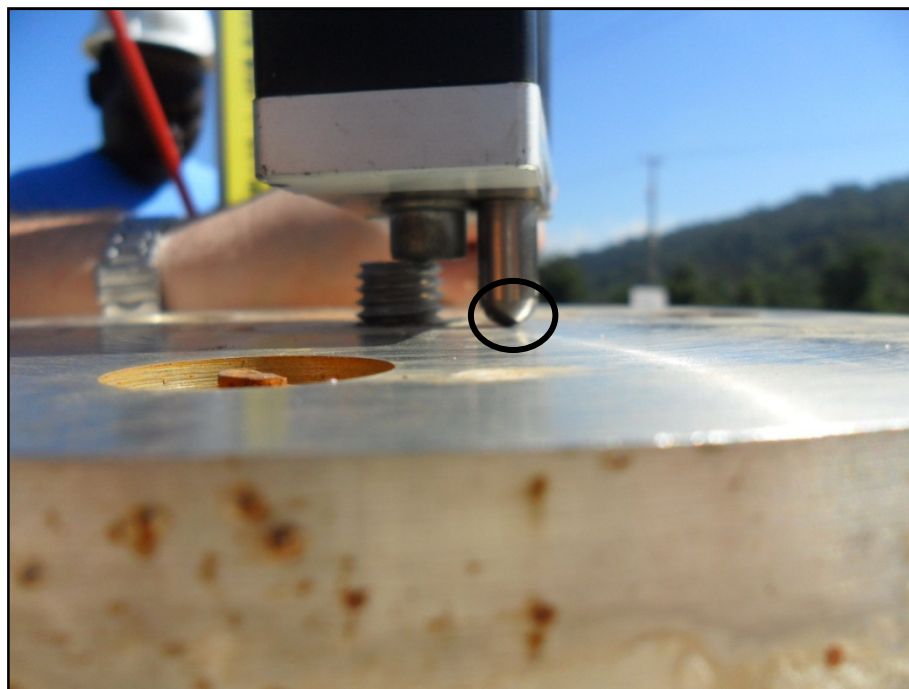
FIGURA 25 - DISPOSIÇÃO DO EQUIPAMENTO ENTRE AS RRNN



FONTE: A autora (2012)

Para o início do nivelamento a partir do PG01 e chegada no PG02, foi realizada uma marcação com o auxílio de um punção sobre a base de centragem forçada (Figura 26), a fim de repetir sempre a mesma posição de ocupação da mira em todas as campanhas.

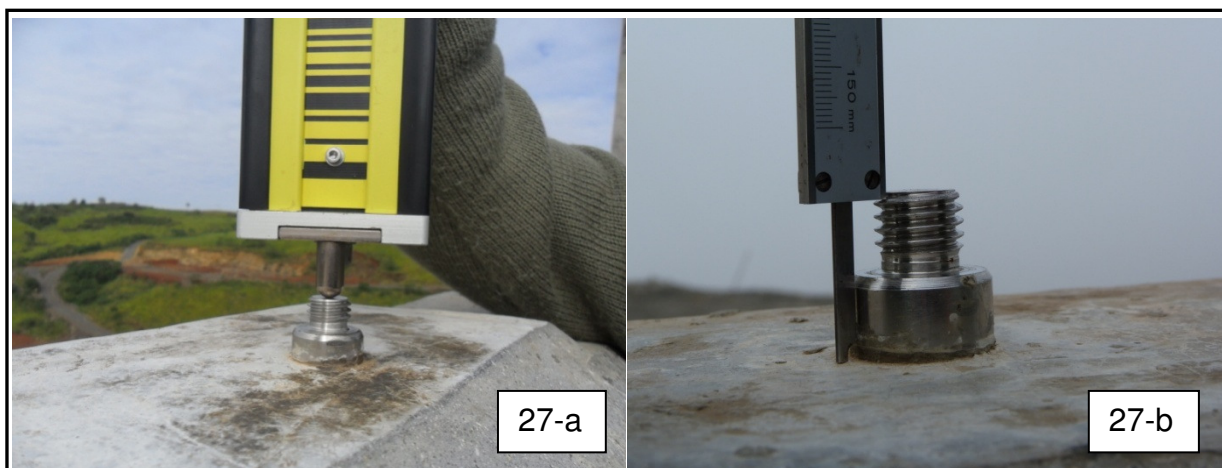
FIGURA 26 - MARCA NO PILAR PARA O POSICIONAMENTO DA MIRA



FONTE: A autora (2012)

Para as outras seções a mira foi apoiada sobre os pinos de aço inoxidável com altura aproximada de 2 cm, como mostram as figuras 27-a e 27-b.

FIGURA 27 - MIRA APOIADA SOBRE UM PINO E MEDIÇÃO DA ALTURA DO MESMO



FONTE: A autora (2012)

Com os dados coletados a partir das 02 campanhas foram calculados os desníveis e posteriormente o recalque absoluto dos pontos MSU_i e também o recalque diferencial, a distorção angular e a velocidade de recalque entre eles.

Esses resultados são importantes para este trabalho, pois foram utilizados como referência para uma análise da qualidade da técnica *Leap-Frog*.

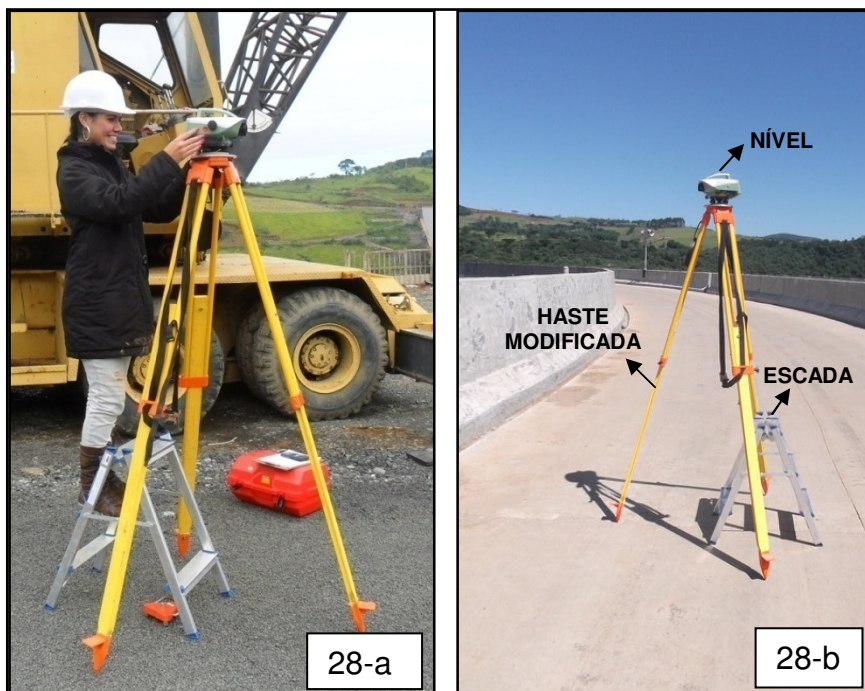
3.4.1 Equipamentos e Materiais

Foram empregados os seguintes equipamentos e materiais para o desenvolvimento do nivelamento geométrico na crista da barragem:

- 01 nível digital DNA03 da Leica Geosystems® com precisão nominal de 0,3 mm/km;
- 02 miras de ínvar com código de barras (3 m);
- 02 sapatas;
- 01 mira de ínvar com código de barras (0,80 m)
- 01 adaptador com espelho;
- 01 bipé adaptado;
- 01 tripé alongado.

Para viabilizar a determinação do desnível entre os pontos da crista (MSU_i) foi necessário o projeto e construção de um tripé especial pois os pinos encontram-se engastados sobre a mureta de proteção que fica à 1,5 m da pista. Esse tripé permite medições com o fio médio do nível, projetado sobre a mira à aproximadamente 2 m da pista que foi construída sobre a barragem. A alternativa encontrada foi substituir as hastes que permitiu variar a altura do tripé que possuía 80 cm para hastes com 1,5 m de comprimento (Figura 28-a e 28-b).

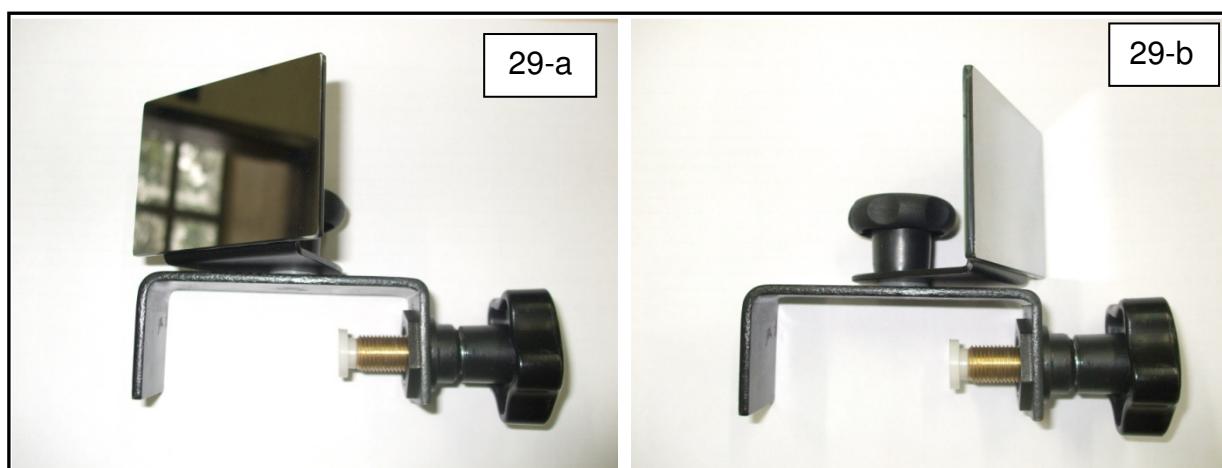
FIGURA 28 - TRIPÉ MODIFICADO E USO DA ESCADA PARA REALIZAÇÃO DA PONTARIA



FONTE: A autora (2012)

Outro problema foi a verticalidade da mira sobre o ponto tendo em vista que o nível esférico utilizado para este fim, nestas condições, fica a aproximadamente 2 m da pista. A alternativa encontrada foi desenvolver um suporte com espelho que instalado na mira permitiu a visualização de sua verticalidade (Figura 29-a e 29-b).

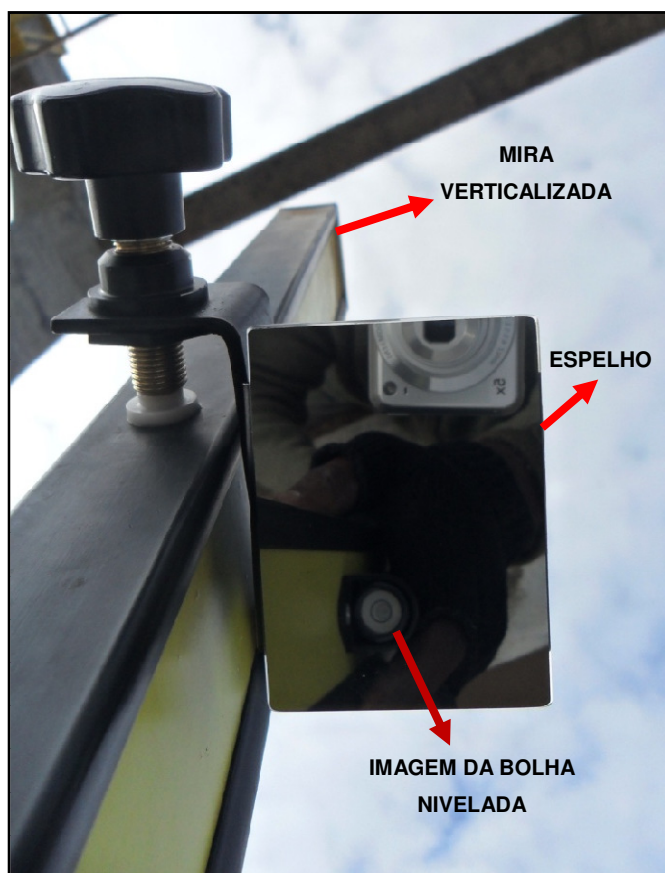
FIGURA 29 - SUPORTE PARA O ESPELHO



FONTE: A autora (2012)

A figura 30 apresenta a imagem da bolha durante o processo de nivelamento da mesma com o auxílio do espelho acoplado à mira.

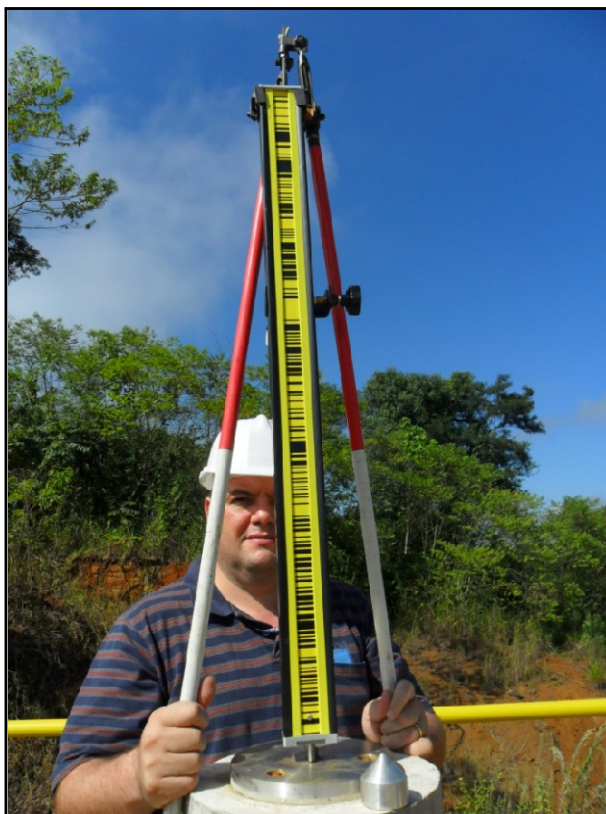
FIGURA 30 - VISÃO DA BOLHA NO ESPELHO ACOPLADO À MIRA



FONTE: A autora (2012)

Outro equipamento que foi necessário construir foi um bipé para garantir a estabilização da mira na vertical (Figura 31).

FIGURA 31 - BIPÉ MODIFICADO PARA GARANTIR A VERTICALIDADE DA MIRA

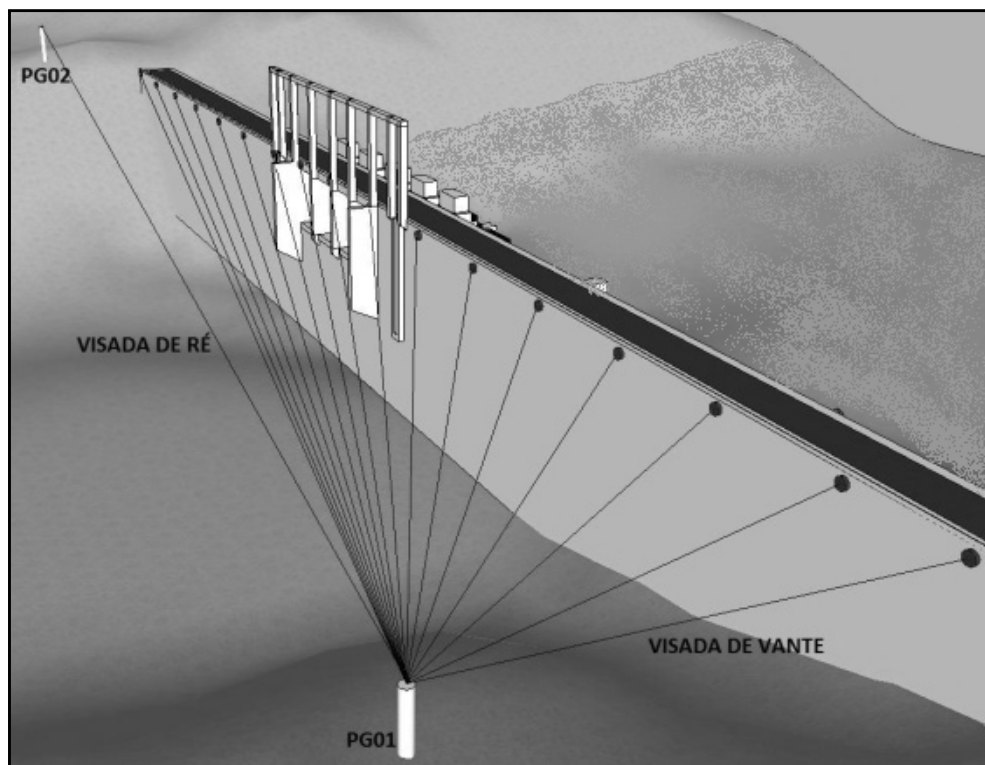


FONTE: A autora (2012)

3.4.2 Nivelamento trigonométrico: Técnica *Leap-Frog*

A fim de analisar a precisão desse método, foi feito o nivelamento ocupando o pilar PG01 realizando leituras de ré sempre no pilar PG02 e visadas de vante para os 17 pontos MSU_i da crista da barragem (Figura 32).

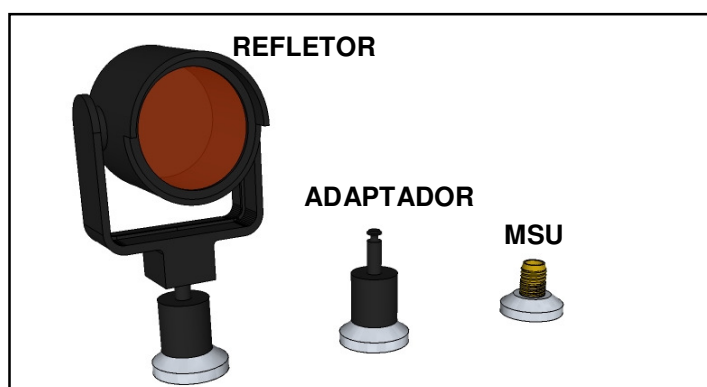
FIGURA 32 - VISTA À MONTANTE DA UHE MAUÁ COM AS VISADAS A PARTIR DO PG01



FONTE: A autora (2012)

Para instalar o refletor sobre os pinos MSU, foi necessário utilizar adaptadores como o apresentado na figura 33.

FIGURA 33 - PRISMA ENCAIXADO, PINO ADAPTADOR E PINO DE AÇO INOXIDÁVEL



AUTOR: ADAPTADO DE VEIGA¹⁵ ET AL.(2012)

¹⁵ VEIGA L. A. K. *et al.* (2012). Primeiro relatório técnico do projeto intitulado: Levantamento geológico-estrutural da região e entorno da barragem da UHE Mauá, uma abordagem inovadora para o monitoramento geodésico nos pontos de risco. Não publicado.

Como a estação total foi instalada fora do centro de cada lance os efeitos da curvatura e refração atmosférica foram considerados acrescentando-se assim, a correção decorrente desses efeitos para ré e vante. Logo, resultou-se na seguinte relação que foi aplicada:

$$\Delta H_{AB} = \left[di_{VANTE} \cdot \cos(Z_{VANTE}) - h_{P_{VANTE}} + \left(\frac{D_{h_{VANTE}}^2}{2R} - \frac{D_{h_{VANTE}}^2 \cdot K}{2R} \right) \right] - \left[di_{RÉ} \cdot \cos(Z_{RÉ}) - h_{P_{RÉ}} + \left(\frac{D_{h_{RÉ}}^2}{2R} - \frac{D_{h_{RÉ}}^2 \cdot K}{2R} \right) \right] \quad (30)$$

Onde:

ΔH_{AB} : Desnível entre dois pontos (A e B);

di_{VANTE} : distância inclinada de vante (do pilar aos pontos MSUi);

Z_{VANTE} : ângulo zenital de vante a partir do pilar para MSUi;

$h_{P_{VANTE}}$: altura do prisma de vante;

$D_{h_{VANTE}}$: distância horizontal medida entre o pilar e o ponto MSUi (em km);

$di_{RÉ}$: distância inclinada de ré;

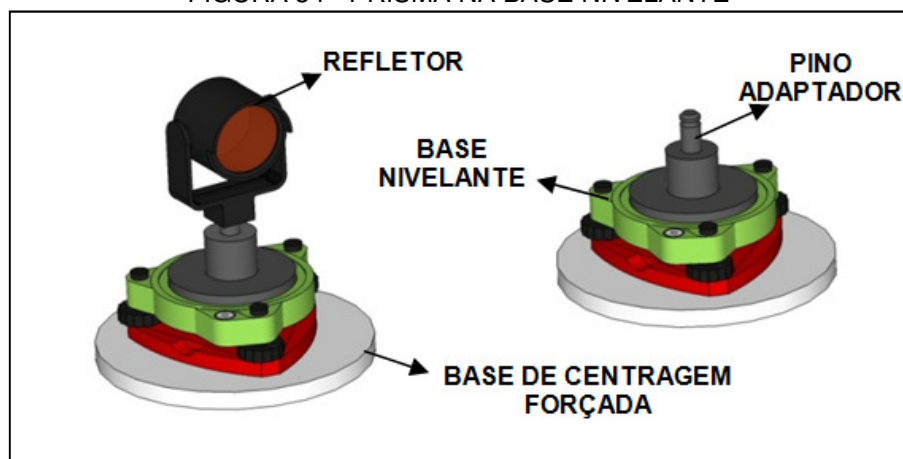
$Z_{RÉ}$: ângulo zenital de ré (de PG01 para PG02 ou o vice-versa);

$h_{P_{RÉ}}$: altura do prisma de ré;

$D_{h_{RÉ}}$: distância horizontal medida entre os pilares (em km).

É importante salientar que a altura do prisma de ré foi diferente da altura do prisma de vante. Na ré o prisma foi colocado em uma base nivelante (Figura 34) e na vante sobre os pinos já descritos anteriormente (Figura 35).

FIGURA 34 - PRISMA NA BASE NIVELANTE



AUTOR: ADAPTADO DE VEIGA¹⁶ *et al.* (2012)

FIGURA 35 - PRISMA NA VISADA DE VANTE



FONTE: A autora (2012)

Segundo Siguel (2012) para a obtenção da altura das bases onde foram colocados os prismas de ré, devem-se levar em conta que no processo convencional de nivelamento das bases são utilizados três parafusos calantes, com isso, a cada

¹⁶ VEIGA L. A. K. *et al.* (2012). Primeiro relatório técnico do projeto Levantamento geológico-estrutural da região e entorno da barragem da UHE Mauá, uma abordagem inovadora para o monitoramento geodésico nos pontos de risco. Não publicado.

posicionamento, um novo plano horizontal é definido. Desenvolveu-se então uma peça que permite travar um dos parafusos calantes (Figura 36). Assim, a altura da base se mantém constante, já que ao realizar o nivelamento com apenas dois parafusos a altura do plano horizontal é definido em função da posição do calante que esta fixa.

FIGURA 36 - PEÇA UTILIZADA PARA TRAVAR O PARAFUSO CALANTE



FONTE: SIGUEL (2012)

A fim de manter a altura do conjunto base e prisma constante em todas as campanhas deste trabalho, foi efetuada a seguinte metodologia:

- 1) Ajustaram-se os parafusos calantes das bases com o intuito de deixar todos com uma mesma altura média. Em seguida, encaixaram-se as peças desenvolvidas garantindo assim a não movimentação dos parafusos.
- 2) Em seguida, encaixou-se uma abraçadeira ao redor do parafuso fixo impedindo o acesso ao mesmo (Figura 37).

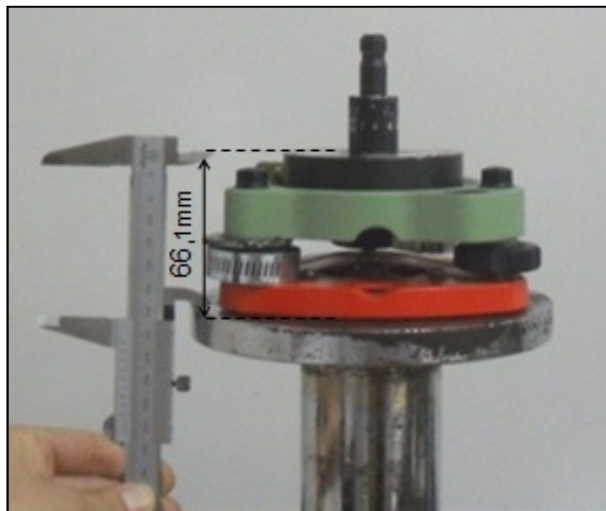
FIGURA 37 - PARAFUSO CALANTE TRAVADO COM A PEÇA DESENVOLVIDA E ABRAÇADEIRA



FONTE: SIGUEL (2012)

3) Com os parafusos fixos, verificou se a altura das bases estava aproximadamente iguais com o auxílio de um paquímetro (Figura 38).

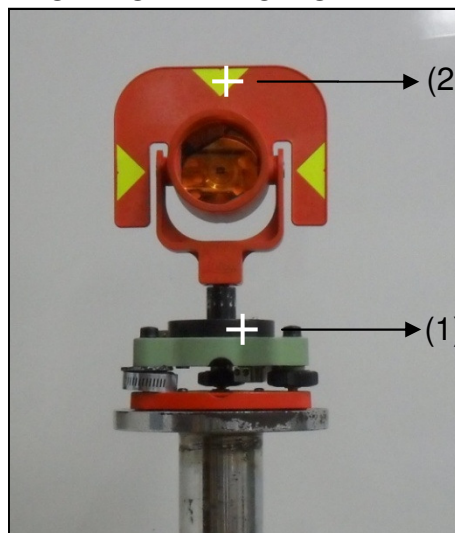
FIGURA 38 - MEDIDA DA ALTURA DA BASE UTILIZANDO PAQUÍMETRO



FONTE: SIGUEL (2012)

4) Para finalizar, foram encaixados o prisma sobre a bases e medida então a alturas de todo o conjunto utilizando-se o paquímetro conforme a figura 39.

FIGURA 39 - POSIÇÕES APROXIMADAS DOS PONTOS ONDE FORAM FEITAS AS SÉRIES DE LEITURAS

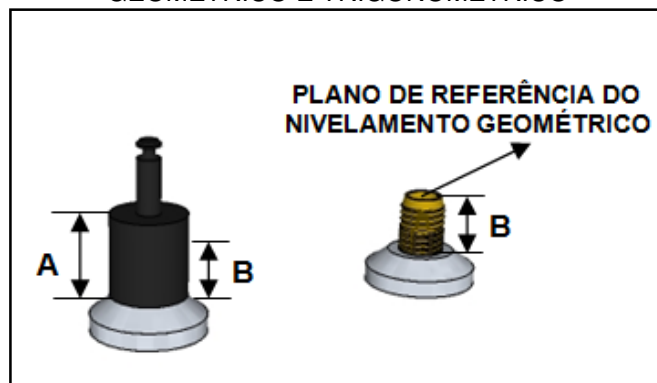


FONTE: SIGUEL (2012)

Para a redução da altura do prisma de vante para o mesmo referencial do nivelamento geométrico foi necessário determinar as alturas do pino (rosca) e do

adaptador (Figura 40). Estas medidas foram realizadas com auxílio de um paquímetro.

FIGURA 40 - ESQUEMA PARA COINCIDIR OS PLANOS DE REFERÊNCIA DO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E TRIGONOMÉTRICO



FONTE: ADAPTADO DE VEIGA¹⁷ ET AL.(2012)

3.4.2.1 Correção da distância

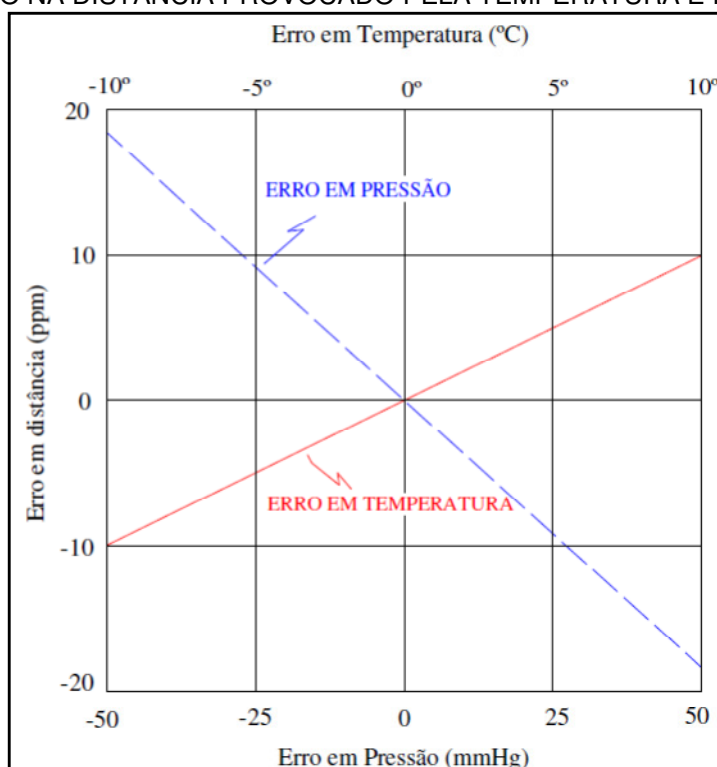
Segundo Rüeger (1996) as variações nas condições atmosféricas provocam um aumento ou diminuição na velocidade de propagação da onda eletromagnética e consequentemente erros sistemáticos nas medidas da distância.

Segundo Faggion (2001) as variações nas condições atmosféricas provocam um aumento ou diminuição da velocidade de propagação da onda eletromagnética e causam por consequência, os erros sistemáticos nas medidas de distâncias.

A figura 41 ilustra um erro de medição de 10° em temperatura ou uma diferença de pressão de 25 mmhg, gera um erro na distância de aproximadamente 10 ppm.

¹⁷ VEIGA L. A. K. *et al.* (2012). Primeiro relatório técnico do projeto Levantamento geológico-estrutural da região e entorno da barragem da UHE Mauá, uma abordagem inovadora para o monitoramento geodésico nos pontos de risco. Não publicado.

FIGURA 41 - ERRO NA DISTÂNCIA PROVOCADO PELA TEMPERATURA E PRESSÃO



FONTE: ADAPTADO DE WOLF (2002)

Segundo Faggion (2001) é devido a essa influência que se faz necessário corrigir as medidas efetuadas de tais fatores. Essa correção pode ser calculada utilizando as seguintes maneiras:

- O ábaco que acompanha o manual do equipamento, no qual a temperatura e a pressão são as informações necessárias;
- As fórmulas do IUGG (*International Union of Geodesy and Geophysics*);
- As fórmulas que acompanham o manual do equipamento.

Alguns testes já demonstraram que a diferença entre os três métodos supracitados está na casa do centésimo do milímetro (FAGGION, 2001). Diante disso, optou-se pela utilização do formulário do manual do equipamento utilizado nas campanhas (Estação Total TCRA1205 da *Leica Geosystems®*):

$$\Delta D = 283,04 - \left[\frac{0,29195 \cdot p}{(1 + \alpha \cdot t)} - \left(\frac{4,126 \cdot 10^{-4} \cdot h}{(1 + \alpha \cdot t)} \right) \cdot 10^x \right] \quad (32)$$

Onde:

ΔD : Correção atmosférica em ppm;

p : pressão atmosférica em mbar;

t : temperatura do ar ambiente em °C;

h : umidade relativa em porcentagem (%);

α : $1/273,16$;

$$x = \left(\frac{7,5t}{237,3 + t} \right) + 0,7857$$

3.4.2.2 Materiais

Para o desenvolvimento do nivelamento trigonométrico foram utilizados os seguintes equipamentos:

- 01 estação total TCRA1205, robotizada com precisão angular (σ_α) igual a $\pm 5''$ e precisão linear (σ_d) igual a $\pm (2 \text{ mm} + 2\text{ppm})$;
- Higrômetros;
- Barômetro aneróide;
- Prismas;
- Paquímetro.

Os cálculos foram desenvolvidos em linguagem MATLAB, com o intuito de automatizar todo o processo, desde descarregar os dados necessários para os cálculos até a obtenção do valor do desnível entre os pontos em questão. As rotinas estão anexadas no corpo do trabalho. Essas rotinas foram transformadas em um executável para que seja utilizada por qualquer usuário que não tenha acesso ao MATLAB.

3.5 ANÁLISE DO RECALQUE

De acordo o Consórcio Energético Cruzeiro do Sul (2011), o deslocamento vertical de projeto é de 7 mm. Essa informação está contida no Manual de operação e controle dos instrumentos de auscultação da barragem e vertedouro que visa estabelecer os procedimentos básicos para a realização das inspeções de campo tendo como principal objetivo acompanhar o comportamento das estruturas e

detectar a ocorrência de eventuais anomalias, durante a fase de enchimento do reservatório e período operacional.

A validação do recalque calculado foi realizada através do teste t para uma média, com a amostra utilizada igual ao conjunto formado pelo recalque calculado a partir do método direto e indireto para alguns marcos de superfície (MSU). Será aplicado o teste de forma separada para cada amostra.

Segundo Marques (2009) as hipóteses estatísticas são suposições feitas acerca dos parâmetros de uma população ou amostra.

Na aplicação de um teste de hipótese, os seguintes passos devem ser respeitados (MARQUES, 2009):

I. Hipótese nula H_0 . Ela diz respeito à hipótese que será testada. Para o presente trabalho será:

$$H_0: r = r_0$$

Sendo:

r : recalque calculado;

r_0 : recalque admissível.

II. Hipótese alternativa H_a , que se refere a qualquer hipótese diferente da hipótese nula.

$$H_a: r \neq r_0$$

III. Fixar o nível de significância α . Ele se refere à probabilidade máxima de ocorrer o erro tipo I. Este, de acordo com Marques (2009) trata-se do erro cometido ao se rejeitar a hipótese nula, sendo ela verdadeira.

IV. Determinar a região de rejeição (RR) da hipótese nula. Essa região é encontrada a partir da tabela referente ao teste t de *student*.

V. A partir da amostra em questão calcular o valor da estatística correspondente:

$$t = \frac{r - r_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (33)$$

Com:

n : Número de dados na amostra;

s : desvio padrão.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (34)$$

O conjunto de valores de t acompanha uma distribuição t de *Student* com um grau de liberdade (GL) igual a $n - 1$ (MARQUES, 2009).

VI. Concluir os resultados do teste. A partir do valor amostral encontrado, tomar a decisão de rejeitar H_0 caso o este valor caia na RR ou aceitar H_0 , para o caso do valor amostral pertencer à região de aceitação (RA) (MARQUES, 2009).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos nos processamentos dos dados obtidos a partir do método direto e indireto, as análises e discussões.

O quadro 3 apresenta os valores obtidos a partir do nivelamento geométrico, referente às campanhas realizadas em março, junho, julho e agosto de 2012 na UHE Mauá.

QUADRO 3 - DESNÍVEIS OBTIDOS A PARTIR DO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO

Linha	Mar/12	Jun/12	Jul/12	Ago/12
PG01 - RN05	-1,2596	-1,2598	-1,2597	-1,2598
RN05 - MSU01	-2,8446	-2,8432	-2,8440	-2,8441
MSU01 - MSU02	-0,0035	-0,0037	-0,0039	-0,0036
MSU02 - MSU03	-0,0013	-0,0015	-0,0022	-0,0023
MSU03 - MSU04	-0,0019	-0,0022	-0,0025	-0,0030
MSU04 - MSU05	0,0017	0,0018	0,0015	0,0014
MSU05 - MSU06	0,0011	0,0007	0,0005	0,0005
MSU06 - MSU07	-0,0049	-0,0052	-0,0052	-0,0051
MSU07 - MSU08	0,0004	0,0002	0,0004	0,0003
MSU08 - MSU09	-0,0003	-0,0007	-0,0008	-0,0007
MSU09 - MSU10	0,0042	0,0044	0,0043	0,0045
MSU10 - MSU11	0,0038	0,0036	0,0036	0,0034
MSU11 - MSU12	-0,0037	-0,0031	-0,0031	-0,0032
MSU12 - MSU13	-0,0008	-0,0006	-0,0004	-0,0006
MSU13 - MSU14	0,0052	0,0056	0,0059	0,0056
MSU14 - MSU15	-0,0029	-0,0024	-0,0020	-0,0017
MSU15 - MSU16	0,0018	0,0023	0,0024	0,0023
MSU16 - MSU17	-0,0021	-0,0022	-0,0020	-0,0020
MSU17 - PILAR02	15,4039	15,4052	15,4073	15,4032
PG01 - PG02	11,2966	11,2991	11,2999	11,2948

FONTE: A autora (2012)

Na sequência apresenta-se a diferença entre os desníveis, apresentados na tabela anterior, utilizando como referência os desníveis obtidos em março. Cabe resaltar que em março o túnel de deriva do rio ainda estava aberto, portanto antes de iniciar a formação do reservatório.

QUADRO 4 - DIFERENÇA ENTRE OS DESNÍVEIS OBTIDOS PELO MÉTODO DIRETO

Linha	Março/Agosto (mm)	Março/Julho (mm)	Março/Junho (mm)
PG01 - RN05	-0,2	-0,1	-0,2
RN05 - MSU01	0,5	0,6	1,4
MSU01 - MSU02	-0,1	-0,4	-0,2
MSU02 - MSU03	-1	-0,9	-0,2
MSU03 - MSU04	-1,1	-0,6	-0,3
MSU04 - MSU05	-0,3	-0,2	0,1
MSU05 - MSU06	-0,6	-0,6	-0,4
MSU06 - MSU07	-0,2	-0,3	-0,3
MSU07 - MSU08	-0,1	0	-0,2
MSU08 - MSU09	-0,4	-0,5	-0,4
MSU09 - MSU10	0,3	0,1	0,2
MSU10 - MSU11	-0,4	-0,2	-0,2
MSU11 - MSU12	0,5	0,6	0,6
MSU12 - MSU13	0,2	0,4	0,2
MSU13 - MSU14	0,4	0,7	0,4
MSU14 - MSU15	1,2	0,9	0,5
MSU15 - MSU16	0,5	0,6	0,5
MSU16 - MSU17	0,1	0,1	-0,1
MSU17 - PILAR02	-0,7	3,4	1,3
PG01 - PG02	-1,8	3,3	2,5

As diferenças encontradas entre as campanhas estão abaixo do milímetro, portanto dentro do erro admissível ($1\text{mm}/\sqrt{k}$, onde k é a média da distância nivelada e contranivelada entre o MSU_i), indicando estabilidade da estrutura.

No nivelamento trigonométrico, obtiveram-se valores de desníveis a partir dos pilares PG01 e PG02 para todas as campanhas. O quadro 5 exhibe os desníveis relativos a partir da média entre os pilares PG01 e PG02 obtidos com a técnica *Leap-Frog*, usando coeficiente de refração $k=0,13$ no cálculo dos desníveis das quatro campanhas.

QUADRO 5 - DESNÍVEIS RELATIVOS A PARTIR DA MÉDIA ENTRE OS PILARES PG01 E PG02 A PARTIR DA TÉCNICA DE LEAP-FROG

Linha	Mar/12	Jun/12	Jul/12	Ago/12
MSU01 - MSU02	-0,003	-0,004	-0,005	-0,004
MSU02 - MSU03	0,001	-0,002	-0,001	-0,006
MSU03 - MSU04	-0,004	-0,002	-0,004	-0,002
MSU04 - MSU05	0,001	0,002	0,000	0,001
MSU05 - MSU06	0,002	0,001	0,002	0,029
MSU06 - MSU07	0,014	-0,005	-0,006	-0,007
MSU07 - MSU08	--	0,000	0,001	0,001
MSU08 - MSU09	--	-0,001	0,002	0,002
MSU09 - MSU10	-0,006	0,004	0,001	0,001
MSU10 - MSU11	0,005	0,004	0,004	0,004
MSU11 - MSU12	-0,002	-0,003	-0,001	-0,003
MSU12 - MSU13	0,000	-0,001	-0,001	-0,002
MSU13 - MSU14	0,002	0,006	0,006	0,006
MSU14 - MSU15	0,001	-0,002	0,000	-0,001

MSU15 - MSU16	0,001	0,002	0,002	0,002
MSU16 - MSU17	-0,003	-0,002	-0,001	-0,002

É possível perceber a falta de uma observação, causada pelo seguinte fator:

- Na primeira campanha a partir do PG01 não foi feita a leitura no ponto MSU08 devido à lona plástica que estava sendo utilizada na obra e que encobria tal prisma.

Como no método direto, o quadro 6 exibe a diferença entre os desníveis a partir do método indireto utilizando como referência os desníveis obtidos em março.

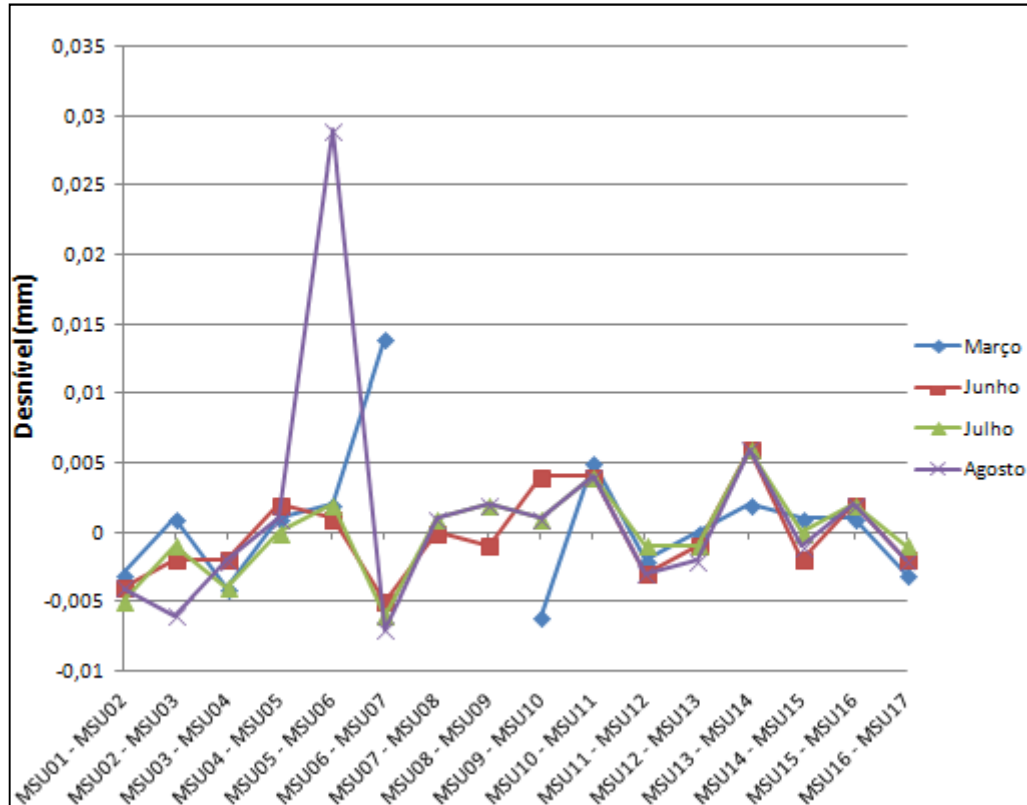
QUADRO 6 - DIFERENÇA ENTRE OS DESNÍVEIS OBTIDOS PELO MÉTODO INDIRETO
USANDO K=0,13

Linha	Março/agosto (mm)	Março/julho (mm)	Março/junho (mm)
MSU01 - MSU02	-1,0	-2,0	-1,0
MSU02 - MSU03	-7,0	-2,0	-3,0
MSU03 - MSU04	2,0	0,0	2,0
MSU04 - MSU05	0,0	-1,0	1,0
MSU05 - MSU06	--	0,0	-1,0
MSU06 - MSU07	0,0	0,0	0,0
MSU07 - MSU08	--	--	--
MSU08 - MSU09	--	--	--
MSU09 - MSU10	7,0	7,0	10,0
MSU10 - MSU11	-1,0	-1,0	-1,0
MSU11 - MSU12	-1,0	1,0	-1,0
MSU12 - MSU13	-2,0	-1,0	-1,0
MSU13 - MSU14	4,0	4,0	4,0
MSU14 - MSU15	-2,0	-1,0	-3,0
MSU15 - MSU16	1,0	1,0	1,0

Provavelmente devido a um erro no posicionamento do prisma sobre o MSU06 na campanha de março e na campanha de agosto, ocorreu um erro grosseiro na comparação das diferenças entre as campanhas. Por este motivo não foram apresentadas no quadro 6. E como na primeira campanha não foi possível realizar a leitura no ponto MSU08, as diferenças relativas ao MSU08 também não foram exibidas.

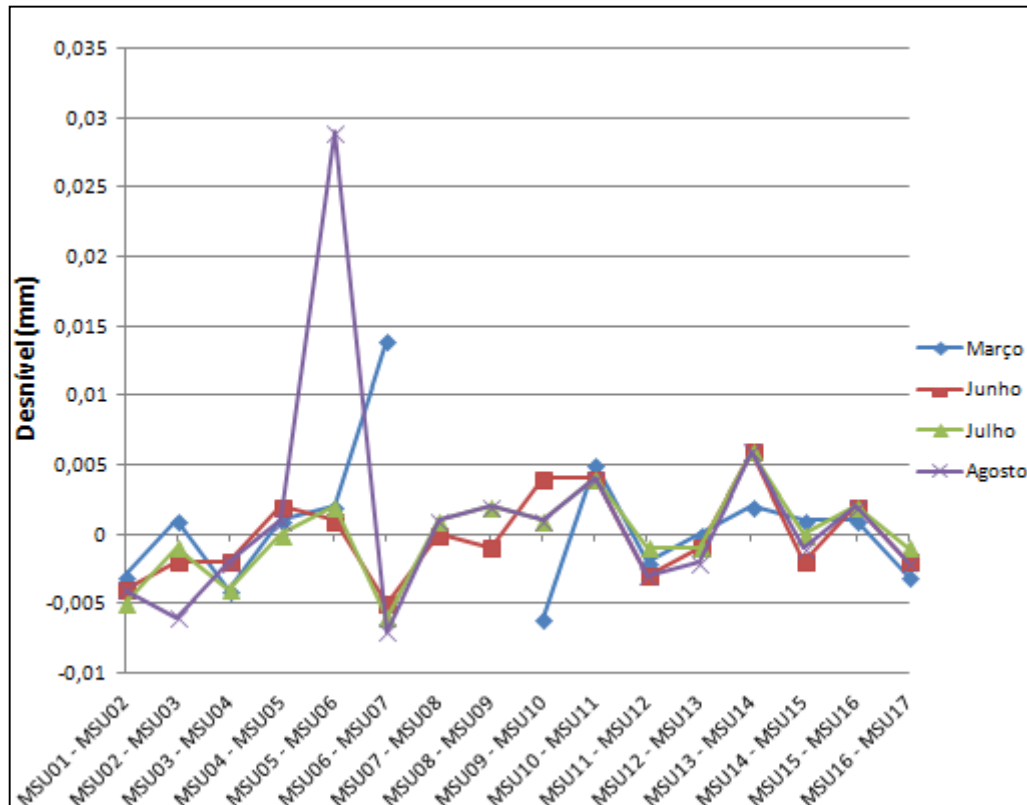
Para melhor visualizar as discrepâncias entre os desníveis encontrados a partir dos métodos *Leap-Frog* e nivelamento geométrico, as figuras 42 e 43 ilustram o que foi apresentado anteriormente nos quadros.

FIGURA 42 - DESNÍVEIS RELATIVOS CALCULADOS A PARTIR DO MÉTODO DIRETO



FONTE: A autora (2012)

FIGURA 43 - DESNÍVEIS RELATIVOS CALCULADOS A PARTIR DO MÉTODO INDIRETO



FONTE: A autora (2012)

A fim de avaliar a técnica *Leap-Frog* foi calculado o fechamento de cada seção a partir da distância nivelada e contra nivelada, e ainda da diferença do desnível encontrado com o nivelamento geométrico.

Os quadros 7, 8, 9 e 10 exibem os valores calculados para ambas as campanhas.

QUADRO 7 - PRECISÃO ALCANÇADA COM A TÉCNICA *LEAP-FROG* A PARTIR DO PG01 EM MARÇO DE 2012

Precisão alcançada com a técnica <i>Leap-Frog</i> (PG01): Mar/2012.					
Pontos	NG (m)	NT (m)	D(km)	Diferença (mm)	mm√k
PG02-MSU01	-15,4070	-15,403	0,835	3,484	3,8
PG02-MSU02	-15,4034	-15,407	0,885	-3,253	3,5
PG02-MSU03	-15,4021	-15,407	0,918	-5,197	5,4
PG02-MSU04	-15,4002	-15,409	0,953	-8,681	8,9
PG02-MSU05	-15,4019	-15,408	0,985	-6,064	6,1
PG02-MSU06	-15,4030	-15,406	1,027	-2,938	2,9
PG02-MSU07	-15,3981	-15,392	1,106	6,479	6,2
PG02-MSU08	-15,3986	-	-	-	-
PG02-MSU09	-15,3983	-15,396	1,153	2,450	2,3
PG02-MSU10	-15,4025	-15,408	1,182	-5,362	4,9
PG02-MSU11	-15,4063	-15,403	1,198	3,194	2,9
PG02-MSU12	-15,4027	-15,406	1,258	-3,436	3,1
PG02-MSU13	-15,4019	-15,404	1,297	-1,727	1,5
PG02-MSU14	-15,4071	-15,405	1,344	1,866	1,6
PG02-MSU15	-15,4042	-15,401	1,385	2,807	2,4
PG02-MSU16	-15,4060	-15,400	1,423	5,773	4,8
PG02-MSU17	-15,4039	-15,403	1,472	0,914	0,8

FONTE: A autora (2012)

Descrição do quadro 7:

- Segunda coluna: desníveis encontrados a partir do nivelamento geométrico;
- Terceira coluna: desníveis obtidos a partir do nivelamento trigonométrico, técnica *Leap-Frog*;
- Quarta coluna: comprimento total da seção, ou seja, é a soma da distância da visada de ré com a de vante;
- Quinta coluna: diferença entre os desníveis obtidos com o nivelamento geométrico e a técnica *Leap-Frog*;
- Sexta coluna: fechamento da seção em milímetros, tomando a diferença de desníveis (quinta coluna) pelo comprimento total da seção em quilômetros.

QUADRO 8 - PRECISÃO ALCANÇADA A PARTIR DO PG02 EM MARÇO DE 2012

Precisão alcançada com a técnica <i>Leap-Frog</i> (PG02): Mar/2012.					
Pontos	NG (m)	NT (m)	D (km)	Diferença (mm)	mm/vk
PG01-MSU01	-4,1042	-4,102	1,505	1,73	1,4
PG01-MSU02	-4,1078	-4,105	1,474	2,45	2
PG01-MSU03	-4,1091	-4,103	1,417	5,61	4,7
PG01-MSU04	-4,1110	-4,110	1,367	1,48	1,3
PG01-MSU05	-4,1093	-4,109	1,327	0,25	0,2
PG01-MSU06	-4,1082	-4,107	1,278	0,83	0,7
PG01-MSU07	-4,1131	-	-	-	-
PG01-MSU08	-4,1126	-4,112	1,193	0,14	0,1
PG01-MSU09	-4,1129	-4,110	1,143	2,77	2,6
PG01-MSU10	-4,1087	-4,110	1,113	-1,61	1,5
PG01-MSU11	-4,1049	-4,106	1,096	-1,08	1
PG01-MSU12	-4,1085	-4,108	1,036	0,68	0,7
PG01-MSU13	-4,1093	-4,110	0,997	-1,14	1,2
PG01-MSU14	-4,1041	-4,105	0,95	-1,10	1,1
PG01-MSU15	-4,1070	-4,107	0,91	0,10	0,1
PG01-MSU16	-4,1051	-4,106	0,876	-0,73	0,8
PG01-MSU17	-4,1073	-	-	-	-

FONTE: A autora (2012)

QUADRO 9 - PRECISÃO ALCANÇADA A PARTIR DO PG01 EM JUNHO DE 2012

Precisão alcançada com a técnica <i>Leap-Frog</i> (PG01): Jun/2012.					
Pontos	NG (m)	NT (m)	D (km)	Diferença (mm)	mm/vk
PG02-MSU01	-15,4083	-	-	-	-
PG02-MSU02	-15,4046	-15,409	0,885	-4,46	4,7
PG02-MSU03	-15,4031	-15,409	0,918	-6,20	6,5
PG02-MSU04	-15,4010	-15,411	0,953	-9,76	10
PG02-MSU05	-15,4028	-15,410	0,985	-6,82	6,9
PG02-MSU06	-15,4034	-15,408	1,027	-5,06	5
PG02-MSU07	-15,3982	-15,413	1,063	-15,25	14,8
PG02-MSU08	-15,3984	-15,413	1,106	-15,02	14,3
PG02-MSU09	-15,3977	-15,410	1,153	-12,57	11,7
PG02-MSU10	-15,4021	-15,408	1,182	-5,73	5,3
PG02-MSU11	-15,4057	-15,405	1,198	0,41	0,4
PG02-MSU12	-15,4026	-15,405	1,258	-2,43	2,2
PG02-MSU13	-15,4019	-15,407	1,297	-4,60	4
PG02-MSU14	-15,4075	-15,400	1,344	7,75	6,7
PG02-MSU15	-15,4051	-15,402	1,385	3,40	2,9
PG02-MSU16	-15,4074	-15,400	1,423	7,78	6,5
PG02-MSU17	-15,4052	-15,399	1,472	6,03	5

FONTE: A autora (2012)

QUADRO 10 - PRECISÃO ALCANÇADA COM A TÉCNICA *LEAP-FROG* A PARTIR DO PG02 EM JUNHO DE 2012

Precisão alcançada com a técnica <i>Leap-Frog</i> (PG02): Jun/2012.					
Pontos	NG (m)	NT (m)	Dt (km)	Diferença (mm)	mm/vk
PG01-MSU01	-4,1029	-4,105347	1,505	-2,40	2,0
PG01-MSU02	-4,1067	-4,111677	1,474	-5,02	4,1
PG01-MSU03	-4,1082	-4,112524	1,417	-4,36	3,7
PG01-MSU04	-4,1103	-4,116106	1,367	-5,78	4,9
PG01-MSU05	-4,1085	-4,116188	1,327	-7,66	6,7
PG01-MSU06	-4,1079	-4,114073	1,278	-6,22	5,5
PG01-MSU07	-4,1131	-	-	-	-

PG01-MSU08	-4,1128	-4,121977	1,193	-9,14	8,4
PG01-MSU09	-4,1136	-4,118765	1,143	-5,20	4,9
PG01-MSU10	-4,1092	-4,117208	1,113	-8,04	7,6
PG01-MSU11	-4,1056	-4,113948	1,096	-8,39	8,0
PG01-MSU12	-4,1087	-4,114912	1,036	-6,23	6,1
PG01-MSU13	-4,1093	-4,118017	0,997	-8,69	8,7
PG01-MSU14	-4,1038	-4,112778	0,95	-9,02	9,3
PG01-MSU15	-4,1062	-4,114371	0,91	-8,21	8,6
PG01-MSU16	-4,1039	-4,113319	0,876	-9,45	10,1
PG01-MSU17	-4,1061	-	-	-	-

FONTE: A autora (2012)

Os resultados obtidos com a campanha realizada em março (primeira campanha) foram melhores em relação aos alcançados com a segunda campanha realizada em junho. Um dos fatores que pode explicar isso são as condições de trabalho da segunda campanha, uma vez que estava anoitecendo e a realização preliminar da pontaria pode ter sido prejudicada.

Observa-se também que à medida que a distância aumenta, a precisão do nivelamento é degradada. Com isso, a fim de melhorar a precisão alcançada com a técnica *Leap-Frog* calculou-se a média dos desníveis relativos a cada ponto da crista da barragem (MSU_i) decorrentes dos levantamentos feitos a partir dos pilares PG01 e PG02.

O quadro 11 exibe a precisão alcançada a partir da média dos valores de desníveis encontrados pela técnica *Leap-Frog* para março.

QUADRO 11 - PRECISÃO ATINGIDA A PARTIR DA MÉDIA DOS DESNÍVEIS EM MARÇO DE 2012

Precisão alcançada com a técnica <i>Leap-Frog</i> (média): Mar/2012.				
Pontos	NG (m)	NT (m)	Diferença (mm)	mmvk
PG01-MSU01	-4,10424	-4,10250	-1,27	0,8
PG01-MSU02	-4,10776	-4,10551	2,86	1,9
PG01-MSU03	-4,10910	-4,10490	0,39	0,3
PG01-MSU04	-4,11100	-4,10871	2,98	2,2
PG01-MSU05	-4,10928	-4,10801	3,11	2,3
PG01-MSU06	-4,10817	-4,10616	2,00	1,6
PG01-MSU07	-4,11305	-4,09186	21,19	8,9
PG01-MSU08	-4,11261	-	-	-
PG01-MSU09	-4,11294	-4,11016	2,77	2,4
PG01-MSU10	-4,10870	-4,11626	-7,56	6,8
PG01-MSU11	-4,10485	-4,11172	-6,86	6,3
PG01-MSU12	-4,10851	-4,11415	-5,64	5,5
PG01-MSU13	-4,10933	-4,11421	-4,88	4,9
PG01-MSU14	-4,10412	-4,11239	-8,27	8,7
PG01-MSU15	-4,10698	-4,11132	-4,34	4,8
PG01-MSU16	-4,10515	-4,11025	-5,10	5,8
PG01-MSU17	-4,10730	-4,11296	-5,66	-

FONTE: A autora (2012)

Para calcular a média dos desníveis referente à técnica *Leap-Frog* foram utilizados os desníveis relativos (MSU01-MSU02, MSU02-MSU03, etc.) obtidos dos levantamentos realizados a partir do PG01 e do PG02. A falta de dados explicada anteriormente justifica a impossibilidade de calcular a precisão para os pontos PG01-MSU07, PG01-MSU08 e PG01-MSU17 para a primeira campanha. Devido a essa falta de dados, os desníveis em negrito não referem à média e sim ao desnível obtido a partir de um dos pilares.

Para fins de apresentação, os cálculos referentes a junho, julho e agosto serão apresentados de forma breve a partir dos quadros 12,13 e 14.

QUADRO 12 - PRECISÃO ATINGIDA A PARTIR DO PG01 EM JUNHO, JULHO E AGOSTO

Pontos	Jun (mm√k)	Jul (mm√k)	Ago (mm√k)
PG02-MSU01	-	1,3	3,3
PG02-MSU02	4,7	7,0	1,5
PG02-MSU03	6,5	9,4	0,8
PG02-MSU04	10,0	14,9	2,6
PG02-MSU05	6,9	11,4	2,0
PG02-MSU06	5,0	8,9	1,1
PG02-MSU07	14,8	20,0	3,5
PG02-MSU08	14,3	18,7	3,2
PG02-MSU09	11,7	16,8	2,9
PG02-MSU10	5,3	11,3	1,9
PG02-MSU11	0,4	3,5	1,8
PG02-MSU12	2,2	7,9	1,0
PG02-MSU13	4,0	8,2	1,4
PG02-MSU14	6,7	2,6	2,6
PG02-MSU15	2,9	0,5	2,3
PG02-MSU16	6,5	4,3	2,9
PG02-MSU17	5,0	1,9	2,4

FONTE: A autora (2012)

QUADRO 13 - PRECISÃO ATINGIDA A PARTIR DO PG02 EM JUNHO, JULHO E AGOSTO

Pontos	Jun (mm√k)	Jul (mm√k)	Ago (mm√k)
PG01-MSU01	2,0	1,6	2,0
PG01-MSU02	4,1	3,1	2,1
PG01-MSU03	3,7	3,2	3,2
PG01-MSU04	4,9	4,7	3,0
PG01-MSU05	6,7	7,4	3,0
PG01-MSU06	5,5	6,6	5,9
PG01-MSU07	-	-	-
PG01-MSU08	8,4	7,5	3,7
PG01-MSU09	4,9	5,6	3,5
PG01-MSU10	7,6	8,7	3,9
PG01-MSU11	8,0	9,9	3,9
PG01-MSU12	6,1	8,4	4,0
PG01-MSU13	8,7	9,8	4,4
PG01-MSU14	9,3	11,0	4,5

PG01-MSU15	8,6	9,7	4,5
PG01-MSU16	10,1	9,9	4,8
PG01-MSU17	-	-	-

FONTE: A autora (2012)

QUADRO 14 - PRECISÃO ATINGIDA A PARTIR DA MÉDIA EM JUNHO, JULHO E AGOSTO

Pontos	Jun (mm√k)	Jul (mm√k)	Ago (mm√k)
PG01-MSU01	-	1,6	4,1
PG01-MSU02	3,4	2,3	4,0
PG01-MSU03	2,9	1,6	3,4
PG01-MSU04	3,2	2,5	3,6
PG01-MSU05	4,3	3,8	3,5
PG01-MSU06	3,7	2,8	6,3
PG01-MSU07	-	3,8	6,1
PG01-MSU08	4,0	3,6	6,0
PG01-MSU09	0,7	1,0	6,1
PG01-MSU10	2,9	4,0	5,8
PG01-MSU11	3,6	4,2	5,8
PG01-MSU12	1,1	2,7	5,7
PG01-MSU13	2,8	3,2	5,6
PG01-MSU14	2,5	3,6	5,5
PG01-MSU15	1,9	2,0	5,5
PG01-MSU16	2,8	2,3	5,3
PG01-MSU17	-	0,1	1,2

FONTE: A autora (2012)

A partir dessas médias dos desníveis foi possível chegar a valores compatíveis a um nivelamento geométrico de primeira ordem. Chegou a uma precisão média de 2,2mm√k; 2,7mm√k; 3,0mm√k para março, junho e julho respectivamente. Na última campanha, em agosto, a média encontrada foi de 5,7mm√k.

Com o objetivo de avaliar a influência a refração atmosférica e curvatura da terra no cálculo do desnível, utilizando *Leap-Frog*, determinou-se este coeficiente utilizando as equações 27 e 28 apresentadas na seção 2.5.4.

A seguir é apresentada uma comparação entre os desníveis em milímetros obtidos utilizando a técnica *Leap-Frog*, variando o k e ainda sem aplicar a Correção de Curvatura e Refração para a campanha de julho. Essa campanha foi escolhida de forma aleatória para essa análise.

QUADRO 15 - DESNÍVEIS VARIANDO O COEFICIENTE DE REFRAÇÃO

Pontos	Valor de K			
	2,00	-1.035	0,13	Sem
MSU01 - MSU02	0,0054	0,0030	0,0039	-0,0046
MSU02 - MSU03	0,0015	-0,0007	0,0002	-0,0009
MSU03 - MSU04	0,0049	0,0019	0,0030	-0,0039

MSU04 - MSU05	0,0003	-0,0029	-0,0017	0,0008
MSU05 - MSU06	0,0012	-0,0038	-0,0018	0,0004
MSU06 - MSU07	0,0095	0,0046	0,0064	-0,0078
MSU07 - MSU08	0,0031	-0,0035	-0,0009	-0,0010
MSU08 - MSU09	0,0026	-0,0057	-0,0026	0,0002
MSU09 - MSU10	0,0023	-0,0035	-0,0012	-0,0004
MSU10 - MSU11	-0,0024	-0,0058	-0,0045	0,0035
MSU11 - MSU12	0,0098	-0,0035	0,0016	-0,0054
MSU12 - MSU13	0,0060	-0,0036	0,0001	-0,0029
MSU13 - MSU14	0,0017	-0,0111	-0,0062	0,0026
MSU14 - MSU15	0,0076	-0,0043	0,0002	-0,0037
MSU15 - MSU16	0,0050	-0,0064	-0,0020	-0,0013
MSU16 - MSU17	0,0107	-0,0056	0,0007	-0,0053

FONTE: A autora (2012)

Os valores de k utilizados para o cálculo dos desníveis apresentados anteriormente, foram calculados a partir da equação 27 com os dados provenientes do pilar PG02 ($k = 2,00$) e a partir da equação 28 ($k = -1,035$). Admitindo que os desníveis obtidos com o nivelamento geométrico de primeira ordem são mais confiáveis, pois o erro de fechamento de uma seção é menor do que $1\text{mm}/\sqrt{\text{km}}$, estes foram utilizados como padrão. Na sequência apresentam-se os resultados da comparação entre os desníveis obtidos variando o valor de k e os obtidos com nivelamento geométrico (Quadro 16).

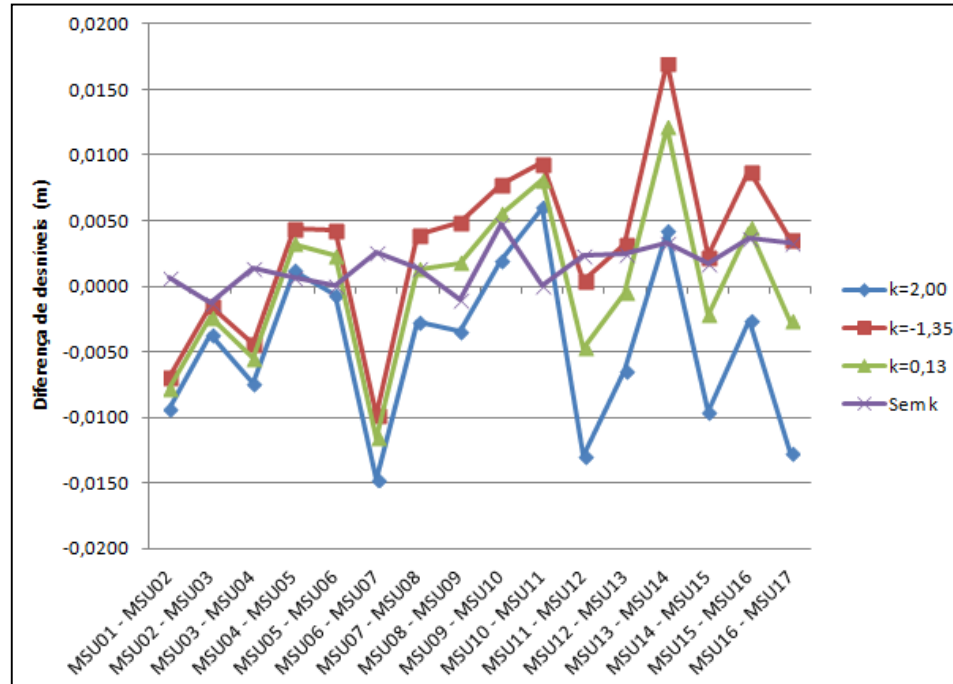
QUADRO 16 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DESNÍVEIS ENCONTRADOS A PARTIR DOS MÉTODOS DIRETO E INDIRETO

Pontos	Valor de k			
	2,00	-1.035	0,13	Sem k
MSU01 - MSU02	-0,0093	-0,0069	-0,0078	0,0007
MSU02 - MSU03	-0,0037	-0,0015	-0,0024	-0,0013
MSU03 - MSU04	-0,0074	-0,0044	-0,0055	0,0014
MSU04 - MSU05	0,0012	0,0044	0,0032	0,0007
MSU05 - MSU06	-0,0007	0,0043	0,0023	0,0001
MSU06 - MSU07	-0,0147	-0,0098	-0,0116	0,0026
MSU07 - MSU08	-0,0027	0,0039	0,0013	0,0014
MSU08 - MSU09	-0,0034	0,0049	0,0018	-0,0010
MSU09 - MSU10	0,0020	0,0078	0,0055	0,0047
MSU10 - MSU11	0,0060	0,0094	0,0081	0,0001
MSU11 - MSU12	-0,0129	0,0004	-0,0047	0,0023
MSU12 - MSU13	-0,0064	0,0032	-0,0005	0,0025
MSU13 - MSU14	0,0042	0,0170	0,0121	0,0033
MSU14 - MSU15	-0,0096	0,0023	-0,0022	0,0017
MSU15 - MSU16	-0,0026	0,0088	0,0044	0,0037
MSU16 - MSU17	-0,0127	0,0036	-0,0027	0,0033

FONTE: A autora (2012)

É apresentado a seguir em forma gráfica o que foi exposto acima no quadro 16 (Figura 44).

FIGURA 44 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DESNÍVEIS ENCONTRADOS A PARTIR DOS MÉTODOS DIRETO E INDIRETO

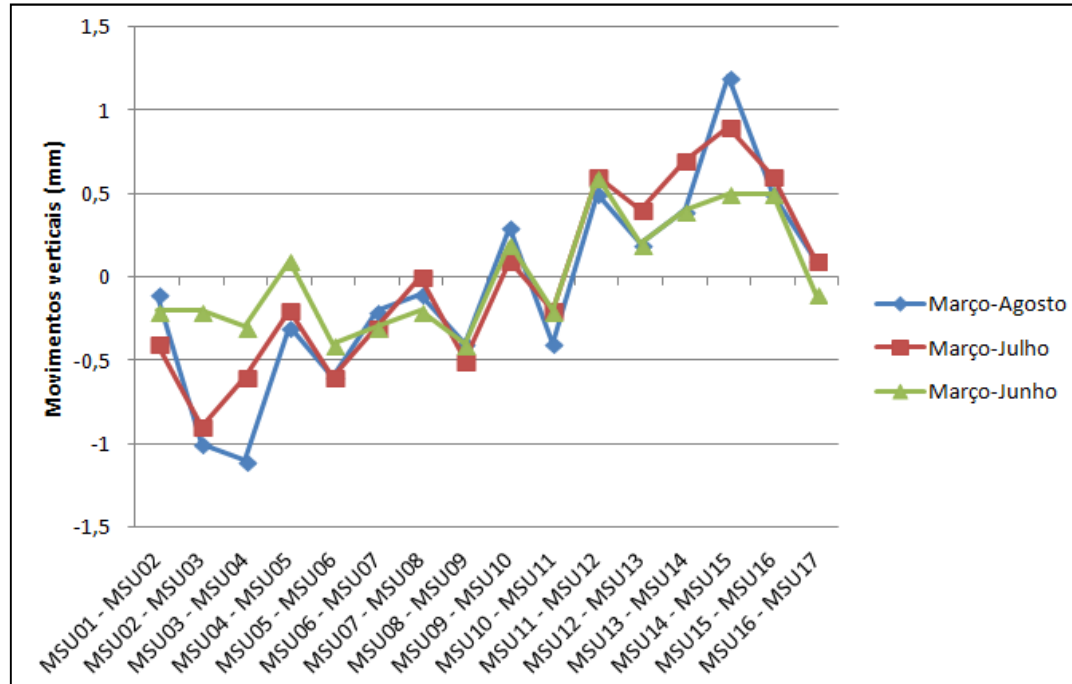


FONTE: A autora (2012)

É possível perceber que a introdução do valor de k calculado na correção da refração e curvatura da Terra não ocasionaram melhorias nos resultados. A melhor sequência é quando não se utiliza a correção, pois as variações ficam todas abaixo de 5mm.

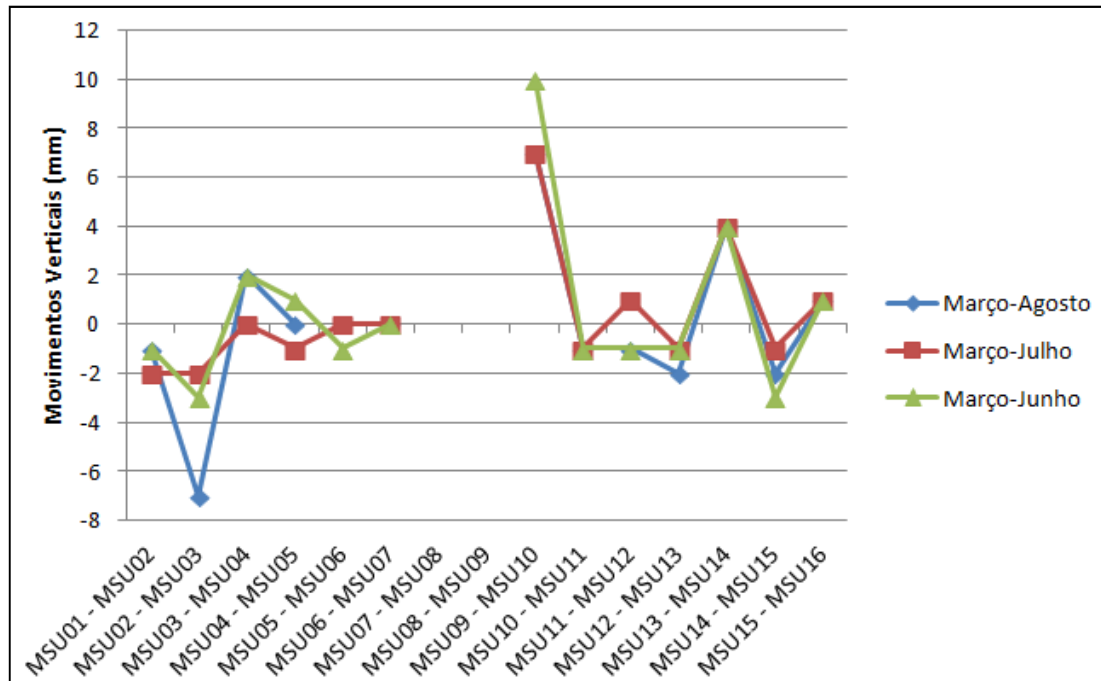
Nas figuras 45 e 46 são apresentados os movimentos verticais (recalque ou elevação) calculados com os métodos utilizados nessa pesquisa, ressaltando que para as análises de recalque com o nivelamento trigonométrico foi feito sem considerar o valor do coeficiente de refração (k).

FIGURA 45 - MOVIMENTOS VERTICAIS OBTIDOS A PARTIR DO MÉTODO DIRETO



FONTE: A autora (2012)

FIGURA 46 - MOVIMENTOS VERTICAIS OBTIDOS A PARTIR DO MÉTODO INDIRETO



FONTE: A autora (2012)

Verificou-se que houve além de recalque para alguns pontos (valores maiores que zero), ocorreu também elevação em outros (valores menores que zero).

Para ambos os métodos houve valores positivos e negativos. Houve, possivelmente, algum erro sistemático nas observações do ponto MSU10, a partir da técnica *Leap-Frog* acarretando um salto no valor do recalque para 10mm.

A fim de verificar se os valores dos recalques encontrados estão dentro da tolerância, para o ponto MSU 05 (Tabela 3) foi aplicado o teste t de *student* para uma média, chegando aos seguintes valores (Tabela 4):

TABELA 3 - DADOS REFERENTE AO PONTO MSU05

MSU05	Nivelamento Geométrico	<i>Leap-Frog</i> (Média)
	Recalque absoluto (mm)	Recalque absoluto (mm)
Març/Jun	2,91	-0,75
Març/Jul	7,29	1,65
Març/Ago	-8,66	2,25

FONTE: A autora (2012)

TABELA 4 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS REFERENTES AO TESTE T PARA UMA MÉDIA

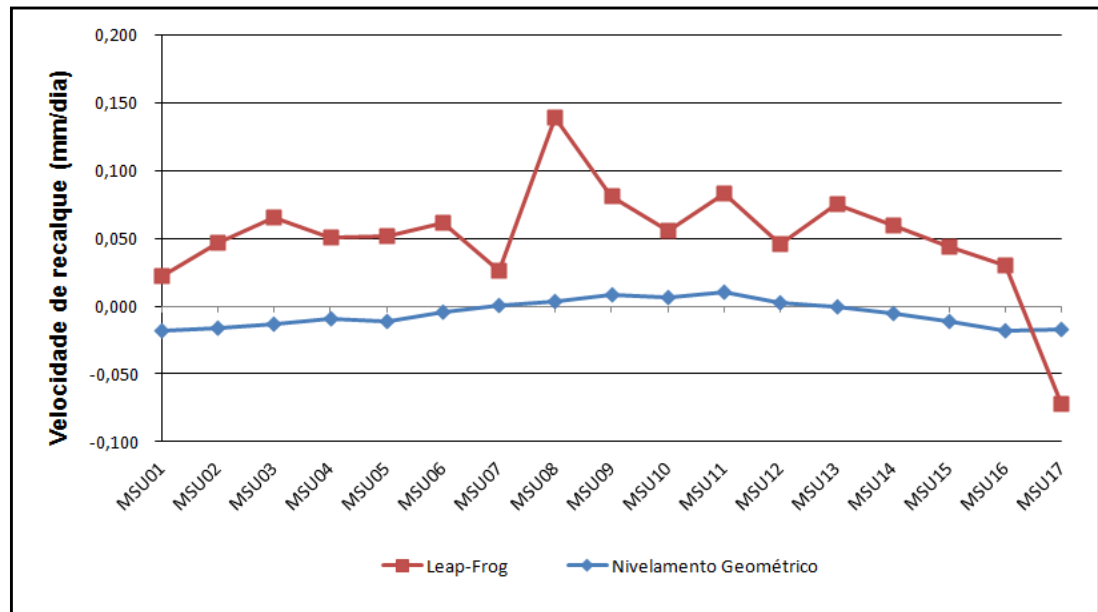
Cálculos	Nivelamento Geométrico	<i>Leap-Frog</i>
Média de recalques (mm)	0.51	1.05
Variância (mm ²)	67.91	2.52
t _{calculado}	-0.17	-4.09
t _{tabelado}	6.96	6.96

FONTE: A autora (2012)

Como $t_{\text{tabelado}} > t_{\text{calculado}}$, rejeita-se então a hipótese nula (recalque obtido igual ao recalque admissível de 7 mm). Sendo assim, pode-se afirmar estatisticamente que o recalque encontrado pelos métodos em questão é diferente do recalque admissível.

A partir dos recalques absolutos foi possível calcular para cada ponto a velocidade de recalque para a estrutura em estudo (Figura 47).

FIGURA 47 - VELOCIDADE DE RECALQUE NA CRISTA DA BARRAGEM A PARTIR DOS MÉTODOS DIRETOS E INDIRETO



FONTE: A Autora (2012)

Pode-se perceber que a partir do nivelamento geométrico chegou-se a valores de velocidade de recalque próximos de 0 mm/dia para os 17 pontos da crista. Já a partir da técnica *Leap-Frog* velocidade de aproximadamente 0,05 mm/dia para a maioria dos pontos da crista da barragem.

Outras informações técnicas importantes são dadas pelo quadro 17, que diz respeito a valores relativos aos pontos da crista: recalque diferencial e distorção angular. Lembrando que esses valores são referentes às campanhas de março e junho. Para março/julho e março/agosto os resultados foram similares aos apresentados a seguir.

QUADRO 17 - RECALQUE DIFERENCIAL E DISTORÇÃO ANGULAR REFERENTE À CRISTA DA BARRAGEM

Pontos	Recalque Diferencial (mm)	Distorção Angular (")
MSU01 - MSU02	-0,180	-0,74"
MSU02 - MSU03	-0,170	-0,7"
MSU03 - MSU04	-0,260	-1,07"
MSU04 - MSU05	0,075	0,31"
MSU05 - MSU06	-0,440	-1,82"
MSU06 - MSU07	-0,325	-1,34"
MSU07 - MSU08	-0,220	-0,91"
MSU08 - MSU09	-0,390	-1,61"
MSU09 - MSU10	0,150	0,62"
MSU10 - MSU11	-0,235	-0,97"
MSU11 - MSU12	0,530	2,19"
MSU12 - MSU13	0,180	0,74"
MSU13 - MSU14	0,360	1,49"

MSU14 - MSU15	0,450	1,86"
MSU15 - MSU16	0,470	1,94"
MSU16 - MSU17	-0,085	-0,35"

FONTE: A autora (2012)

Essas pequenas distorções angulares podem ser explicadas por alguma imprecisão do método, levando em conta que os valores se aproximam de zero.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Para a execução do nivelamento geométrico foi desenvolvido um instrumental auxiliar para suprir as dificuldades que a estrutura nos ofereceu. Em todas as campanhas o nivelamento foi concluído respeitando o erro de fechamento admissível com precisão de até $1 \text{ mm}\sqrt{k}$.

Os resultados da primeira campanha encontrados com a técnica *Leap-Frog* (Quadro 11) tiveram uma precisão no fechamento por seção variando de 0,1 a 8,9 $\text{mm}\sqrt{k}$, porém em 46% dos resultados atingiram uma precisão de até $2 \text{ mm}\sqrt{k}$. A segunda campanha apresentou alguns problemas relacionados ao horário que o levantamento foi realizado. Como foi utilizada uma estação total robotizada, a penumbra dificultou o processo da repetibilidade da leitura nos pontos sobre a crista da barragem. Os valores dos desníveis encontrados a partir dos pilares PG01 e PG02 podem ser consultados através dos quadros 12 e 13. Para a média dos desníveis houve uma evolução na precisão alcançada, chegando a 86% dos resultados com uma precisão de até $3 \text{ mm}\sqrt{k}$. Na terceira campanha (julho) obteve-se um resultado satisfatório, alcançando em 88% dos resultados uma precisão de até $3 \text{ mm}\sqrt{k}$ para a média dos desníveis. Por fim, na campanha realizada em agosto, apenas 25% dos resultados alcançaram uma precisão de até $3 \text{ mm}\sqrt{k}$.

Calculou-se a média entre os valores encontrados a partir do PG01 e PG02, para avaliar a técnica *Leap-Frog*. Com o cálculo dessa média percebeu-se que houve uma melhoria considerável nos resultados. Com isso foi possível propor a técnica *Leap-Frog* como uma alternativa de nivelamento de precisão compatível ao, já consagrado, nivelamento geométrico.

Foi desenvolvido um aplicativo em ambiente MATLAB para o desenvolvimento dos cálculos, deixando assim todo o processo automatizado. O código fonte encontra-se no apêndice desse trabalho e o compilado do mesmo encontra-se disponível no Laboratório de Instrumentação Geodésica.

Os valores de coeficientes de refração, calculados para a UHE Mauá em todas as campanhas foram utilizados na obtenção do desnível a partir da técnica

Leap-Frog, porém observou-se uma degradação dos resultados como pode ser verificado através da figura 44, onde na série referente à diferença de desníveis relacionados aos métodos direto e indireto, a que mais se aproximou do nivelamento geométrico foi onde não se utilizou o valor de k nos cálculos. É possível assim perceber que a introdução do valor de k na correção da refração e curvatura da Terra não ocasionaram melhorias nos resultados. Ainda a partir da figura 44, a melhor sequência é quando não se utiliza a correção, pois as variações ficam todas abaixo de 5mm.

Por fim, o recalque nos pontos da crista da barragem encontrado a partir do nivelamento geométrico no sentido do pilar PG01 para o PG02 variou de 0,3mm a 1,2 mm e a partir da técnica *Leap-Frog* de 1mm a 3mm. Para os dois casos, o recalque encontrado é menor, comprovado estatisticamente, que o valor admissível para a estrutura. Com esses resultados fica proposta então, utilizando o método *Leap-Frog*, uma alternativa para determinar movimentos verticais em grandes estruturas.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se que o monitoramento de movimentos verticais na UHE Mauá seja continuado garantindo assim o conhecimento do comportamento da estrutura.

No que diz respeito aos métodos utilizados no monitoramento futuro, sugere-se continuar os estudos sobre a técnica *Leap-Frog*, desenvolvendo novas análises sobre os dados e consequentemente melhorando sua precisão.

Indica-se estudar os efeitos de refração sobre as medidas e ainda desenvolver uma metodologia para modelagem da mesma.

Recomenda-se ainda determinar, através de testes estatísticos, o grau de consolidação que o recalque terá a partir de um número maior de campanhas.

Sugere-se o desenvolvimento de uma peça para dar suporte à mira sobre a mureta da barragem, facilitando o trabalho no campo.

Por fim, sugere-se que o código fonte desenvolvido e utilizado para essa pesquisa seja continuado, integrando todos os cálculos e focalizando no fácil entendimento ao usuário, possibilitando uma rápida obtenção das informações.

REFERÊNCIAS

ALONSO, U. R. **Previsão e Controle das Fundações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1991.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Geração**: 2010. Disponível em: < http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=8938 > Acessado em 26 de setembro de 2011.

ANDRADE, J.B., **NAVSTAR-GPS**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. UFPR. Curitiba, 1988.

ARANA, J.M. **Geodésia Física**: notas de aula. São Paulo: Departamento de Cartografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia UNESP – Campus de Presidente Prudente, 62 p, 2000.

ASIN, F. M. **Geodesia y Cartografía Matemática**, Madrid: Instituto Geografico Nacional, 1990.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 6122**: projeto e execuções de fundações. Rio de Janeiro. 1996.

ANDOLFATO, S. H. D.; **Sistema de automação de níveis digitais**. Tese (doutorado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2010.

ANDRIOLO, F. R. **Barragens de CCR – Discussões Relacionadas ao projeto, planejamento da construção, controle de qualidade e suas inter-relações**. In: Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, 3., 1998, Foz do Iguaçu, Anais... Foz do Iguaçu, 1998. p. 21-25.

BATISTA, E. T.; GRAÇA, N. G.; PACELLI, W. A. *et al.* **Execução de concreto compactado com rolo em Lajeado – Consolidação da experiência**. In: Congresso Brasileiro do Concreto. 44. 2002, Belo Horizonte, 2002. p.156.

CBDB. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Núcleo de são paulo. **Guia Básico de Segurança de Barragens, São Paulo**: 2001. 78p. Manual.

CBDB. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Histórico**. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/site/historico.asp>>. Acesso em 27/09/11.

CHYZANOWSKI, A.; SECORD J. M. Tilt measurement. In ***The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook***, Ed., J. G. Webster, CRC Press LLC, 1999, p. 15-1 a 15-11.

Consórcio Energético Cruzeiro do Sul. **Manual de operação e controle dos instrumentos de auscultação da barragem e vertedouro**. 2011.

Consórcio Energético Cruzeiro do Sul. **Geração**. 2011. Disponível em: <<http://www.usinamaua.com.br/noticia/35>> Acesso em: 06/09/2011.

CORPS OF ENGINEERS. ***Engineer Manual (EM) 1110-2-2200***. Washington: GRAVITY DAM DESIGN. 1995.

CORPS OF ENGINEERS. ***Engineer Manual (EM) 1110-2-2006*** – Roller-Compacted Concrete. Washington, 2000.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de pavimentos de concreto rolado**. Ministério dos Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, vol.1, Rio de Janeiro. 2002.

D'ALGE, J. C. L. **Estabelecimento de um sistema de altitudes a partir do nivelamento geométrico**. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1986.

DODSON, A. H.; ZAHER, M. **Refraction effects on vertical angle measurements**. *Survey Review*, v. 28, n. 217. 1985.

DUARTE, J. M. G.; MORAES R. B.; OLIVEIRA C. A.; CARDOSO R. M. **Alguns aspectos geotécnicos peculiares do projeto da UHE Mauá**. In: VII Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Foz do Iguaçu, PR. Disponível em: < <http://www.intertechne.com.br/eng/images/FILES/geosul.pdf> >. Acesso em novembro de 2011.

EXÉRCITO DO BRASIL. **Manual Técnico**. Escola de Comando e Estado Maior do Exército, 1975.

BRASIL, Decreto-Lei n. 12.334 de 20 de setembro de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 181, p.1, 21 set., 2010. Seção 1.

FABRÍCIO, M. M; ROSSIGNOLO, J. A. **Tecnologia das Construções II**. Notas de aula. São Carlos. USP, sd.

FAGGION, P. L. **Topografia Aplicada a Terraplanagem**. Curso de Engenharia Cartográfica. UFPR. sd. (Notas de aula).

FAGGION, P. L. **Contribuição para implantação de um sistema de aferição de miras na Universidade Federal do Paraná**. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1993.

FAGGION, P. L. **Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório**. Tese (Doutorado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2001.

FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K.; FREITAS, S. R. C.; SANTOS, D. P. **Desníveis de Primeira Ordem com Estação total**. Série em Ciências Geodésicas, volume 3, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2003.

FILHO L. M.; **O uso do concreto compactado com rolo em barragens – Tendências futuras**. Dissertação (Mestrado). Área de concentração: Geração Hidrelétrica. Engenharia da energia. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG. 2003.

GEMAEL, C. **Introdução a geodésia geométrica** – Primeira parte - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1987.

GEMAEL, C. **Introdução à geodésia física**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 1999.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora da UFPR, 2004.

GIACOMINI, B., HORNINK, G. G., COMPIANI, M. **Biblioteca Digital de Ciências**, 26 out. 2009. Disponível em: <
<http://www.lte.ib.unicamp.br/bdc/visualizarMaterial.php?idMaterial=982> >. Acesso em: 27 abr. 2012.

GOMES, J. P. **Determinação de Desníveis de Precisão Utilizando Estação total**. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2006.

GRANEMANN, D. C. **Estabelecimento de uma rede geodésica para o monitoramento de estruturas: estudo de caso na Usina Hidrelétrica Salto Caxias**, Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005.

HERBERT E. **Nivelamento barométrico no apoio de campo e em levantamento hidrogeológicos no Nordeste**. Rio de Janeiro: Missão Cartográfica Alemã, 1973.

IBGE. FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos**. PR - 1983.

JAMUR, K. P. **Estimativa da resolução de modelos geoidais globais obtidos de missões satelitais e gravimétricos regionais para o estado do Paraná com base em observações GPS sobre RNs**. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2007.

JORDAN, D. W. **Tratado general de topografia**. Barcelona: Editorial G. Gali, 1981. v.1.

KAHMEN, H.; FAIG, W. **Surveying**. Berlin/New York: Walter de Gruyter, 1988.

KHARAGHANI G. A. **Propagation of refraction errors in trigonometric height traversing and geodetic leveling**. Dissertação (Mestrado). Department of Surveying Engineering. University of New Brunswick, Canada, 1987.

KUANG S. **Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications**. Ann Arbor Press, Inc.: Chelsea, Michigan, 1996.

KUPERMAN, S. C. **Barragens brasileiras de concreto compactado com rolo – Passado, presente e futuro.** In: Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, 2., Curitiba. Anais... Curitiba, 1996. p. 240-255.

KUPERMAN, S.C.; MORETTI, M.R.; *et al.* **Realização da instrumentação de Auscultação instalada em barragens da CESP.** In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, p. 116-134, Salvador, BA.

LAME. LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS. **Análise e Caracterização Geológico-Geotécnica de Testemunhos de Rochas Extraídas na Área de Implantação da UHE Mauá – Telêmaco Borba.** PR. 2007.

MARQUES, J. M. **Distribuições contínuas de probabilidade.** Notas de aula. Curitiba. Sd.

MARQUES, J. M. **Estatística: Cursos de engenharia.** Notas de aula. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Estatística. Curitiba, 2000.

MARQUES, J. M.; MARQUES, M. A. M. **Estatística básica para os cursos de engenharia.** Curitiba: Domínio do saber, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais.** 2ª edição. São Paulo, 1994.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações.** São Paulo: UNESP. 2ª edição. 2008.

MOREIRA, A. S. B. **Nivelamento trigonométrico e nivelamento geométrico classe IIN da NBR 13.133: limites e condições de compatibilidade.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

NETO, M. A. S.; *et. al.* **Técnicas de mineração visual de dados aplicadas aos dados de instrumentação da barragem de Itaipu.** Gestão e Produção (*online*). 2010, vol.17, n.4, pp. 721-734. ISSN 0104-530X.

OLIVEIRA, P. J. R.; SALLES, F. **Concreto Compactado à Rolo – características e propriedades.** In: 1º Simpósio de obras em concreto compactado com rolo, São Paulo, SP, 1995.

PALAZZO, D. R.; FILHO, M. L. S.; MOREIRA, A. R.; **A Utilização de Técnicas Geodésicas no Monitoramento de Estruturas Pré-Moldadas.** In: 1º Encontro Nacional de Pesquisa-projeto-produção em Concreto Pré-moldado, São Carlos, SP, 2005.

PETROBRAS. **N-1811:** Instalação de referência de nível profunda. Brasil, 2005. Disponível em: <<http://dc168.4shared.com/doc/zbzLDAMG/preview.html>>. Acesso em: 05/09/2011.

RÜEGER, J. M. **Electronic Distance Measurement: an introduction.** 3th Edition. Berlin: Springer-Verlag, 1996.

SALOMÃO, T. S.; FAGGION P. L. **Determinação de recalque em estruturas utilizando níveis digitais e estações totais.** In: II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife. PE. 2008.

SANTOS, D. P.; **Avaliação do uso de nivelamento trigonométrico no transporte de altitudes para regiões de difícil acesso.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2009.

SCHAAL, R. E. **Efeitos da refração na atmosfera em observações geodésicas próximas ao solo.** Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1995.

SIGUEL, A. R.; **Monitoramento da barragem da Usina Hidrelétrica Mauá utilizando a técnica de irradiação tridimensional.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2012.

US ARMY, **Gravity Dam Design.** Washington: Engineer Manual, 1995a. 88p.

US ARMY, **Instrumentation of Embankment Dams and Levees.** Washington: Engineer Manual, 1995b.

VEIGA, L.A.K.; ZANETTI, M. A. Z.; FAGGION, P. L.; **Apostila de Topografia - Módulo I.** Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática. Curitiba, 2007.

WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. **Elementary surveying: An introduction to Geomatics**. New Jersey: Prentice-Hall, 2002.

ZEISKE, K. **Surveying made easy**. Disponível em: <
<http://www.optics.arizona.edu/optomech/Fall11/lab/files/Class%20notes/Lab%205%20CMM/Leica%20Surveying%20made%20easy.pdf> >. Acesso em: março de 2012.

ANEXOS

ANEXO A - CÓDIGO FONTE DESENVOLVIDO PARA O CÁLCULO DO DESNÍVEL ENTRE DOIS PONTOS APARTIR DA TÉCNICA *LEAP-FROG*

```

clear
clc
%Escolha do arquivo com os dados

[Arq,Cam_Arq] = uigetfile('*.txt', 'Escolha o arquivo com os dados');
dados = fullfile (Cam_Arq,Arq);
dados = load(dados);

num_dados = size(dados);
n_dados = num_dados(1,1);

%% ENTRADA DO NÚMERO DE SÉRIES E DE PONTOS LEVANTADOS

disp(' ')
n_sr=input('Digite o número de séries: ');
disp(' ')
n_pts=input('Digite o número de pontos levantados: ');
disp(' ')

%% sexagesimal para decimal

for i = 2:n_dados
    grau = floor(dados(i,1));
    min = floor((dados(i,1)-grau)*100);
    seg = (((dados(i,1)-grau)*100)-min)*100;
    dec(i-1) = grau+min/60+seg/3600;
end

%% Graus decimais para radianos
i=2;
while i<=(n_dados)
    Z_rad(i,1)=deg2rad(dec(i-1));
    i=i+1;
end
Z_rad=Z_rad(2:n_dados,1);

%% Retirar os angulos zenitas de Re e colocar em outra matriz 'ang_re'

k = size(Z_rad,1);
ang_re(1) = Z_rad(1);
ang_re(k) = Z_rad(k);
Z_rad(k) = 0;
Z_rad(1) = 0;

for i = (n_pts*2+2):(n_pts*2+2):(k-n_pts*2)
    ang_re(i) = Z_rad(i);
    ang_re(i+1) = Z_rad(i+1);
    Z_rad(i) = 0;
    Z_rad(i+1) = 0;
end

```

```

ang_re = ang_re';

while any(Z_rad==0) == 1
    k = size(Z_rad,1);
    i = 1;
    while i<=k
        if Z_rad(i) == 0
            Z_rad(i) = [];
        end
        k = size(Z_rad,1);
        i = i + 1;
    end
end

%% Retirar os zeros das matriz de angulos zenitais de re

while any(ang_re==0) == 1
    k = size(ang_re,1);
    i = 1;
    while i<=k
        if ang_re(i) == 0
            ang_re(i) = [];
        end
        k = size(ang_re,1);
        i = i + 1;
    end
end

%%
% Separação dos ângulos zenitais em PD e PI
a=size(Z_rad);
a=a(1,1);
i=1;
while i<=a
    if Z_rad(i,1)>=pi();
        Z_PI(i,1)=Z_rad(i,1);
    elseif Z_rad(i,1)<pi();
        Z_PD(i,1)=Z_rad(i,1);
    else
        disp('ERRO!')
    end
    i=i+1;
end

a=find(Z_PD);
b=size(a); b=b(1,1);
i=1;
while i<=b
    PD(i,1)=Z_PD(a(i,1),1);
    i=i+1;
end

a=find(Z_PI);
b=size(a); b=b(1,1);
i=1;
while i<=b
    PI(i,1)=Z_PI(a(i,1),1);

```

```

        i=i+1;
    end

%%
% Cálculo do erro de zênite

erro=zeros(n_sr*n_pts,1);
Z=zeros(n_sr*n_pts,1);
k=0;
for serie=1:n_sr
    for pontos=1:n_pts
        pdid=(serie-1)*n_pts + pontos;
        k=k+1;
        pontotras=(n_pts+1-pontos);
        piid=(serie-1)*n_pts + pontotras;
        erro((serie-1)*n_pts+pontos,1)=(2*pi()- (PD(pdid,1)+PI(piid,1)))/2;
    end;
end;

%%
%Erro admissível com 3 sigma do aparelho (5")

erro_adm=3*(deg2rad(5/3600));

%% CALCULO DA MATRIZ DE VALORES ACEITOS
verif=0;
for pontos=1:(n_sr*n_pts)
    if erro(pontos)<=erro_adm
        verific(pontos,1) = 1;
    else
        verific(pontos,1) = 0;
    end
end;

verif

verif_val=0;
verif_val=zeros(n_sr*n_pts,1);
for pontos=1:(n_sr*n_pts)
    if verific(pontos)==1
        verif_val(pontos)=erro(pontos);
    end
end

verif_val;

%% CÁLCULO DO ÂNGULO ZENITAL CORRIGIDO JA COM A MÉDIA PARA CADA PONTO

div=(size(Z_rad,1))/n_sr;
cont = 1;
for ns = 1:n_sr
    j = 2*n_pts*ns;
    k = j - n_pts;
    for i = (k-n_pts+1):k
        while (cont<=n_pts*n_sr)
            a(cont,1) = Z_rad(i,1);

```

```

        a(cont,2) = Z_rad(j,1);
        j = j-1;
        cont = cont*1000;
    end
    cont = (cont/1000)+1;
end
end

for i = 1:(n_pts*n_sr)
    z_vante(i,1) = (2*pi()+a(i,1)-a(i,2))/2;
end

%% Calculo PD e PI dos angulos de Ré

for i = 1:2:n_sr*2
    z_re(i) = (2*pi()+ang_re(i)-ang_re(i+1))/2;
end

z_re = z_re';

% tirar os zeros da matriz
while any(z_re==0) == 1
    k = size(z_re,1);
    i = 1;
    while i<=k
        if z_re(i) == 0
            z_re(i) = [];
        end
        k = size(z_re,1);
        i = i + 1;
    end
end

%% CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS

matriz_dist=dados;
matriz_dist(:,1)=[];
matriz_dist(1,:)=[];

[Arq,Cam_Arq] = uigetfile('*.txt', 'Escolha o arquivo com os dados de T, P
e U');
TPU = fullfile (Cam_Arq,Arq);
TPU = load(TPU);

num_dados = size(TPU);
n_series = num_dados(1,1);

for i = 1:n_series
    T(i) = TPU(i,1);
    P(i) = TPU(i,2);
    U(i) = TPU(i,3);
end

x = (7.5*(T/(273.3+T)))+0.7857;
alfa = 1/273.16;
for i = 1:n_series
    Delta(i) = 283.04-(((0.29195*P(i))/(1+alfa*T(i)))-(((4.126*10^-
4*U(i))/(1+alfa*T(i))))*10^x);

```

```

end

% 'De' está em milímetros, 'C' está em metros e 'Delta' em ppm.

g = n_sr;
k = n_pts*n_sr*2+(n_sr*2);
aux = 1;
while aux <= n_sr
k = (k - (n_pts*2+2));
while k >= 0
    for i = (k+1):(k+(n_pts*2+2))
        De(i) = (matriz_dist(i)*Delta(g))/1000;
        C(i) = De(i)/1000;
        matriz_dist(i) = matriz_dist(i)+C(i);
    end
    g = g-1;
    k = k - 1000;
end
k = k + 1000;
aux = aux + 1;
end

%% Retirar as distancias de RÉ e separar em outro vetor 'dist_re'
k = size(matriz_dist,1);
dist_re(1) = matriz_dist(1);
dist_re(k) = matriz_dist(k);
matriz_dist(k) = 0;
matriz_dist(1) = 0;

for i = (n_pts*2+2):(n_pts*2+2):(k-n_pts*2)
    dist_re(i) = matriz_dist(i);
    dist_re(i+1) = matriz_dist(i+1);
    matriz_dist(i) = 0;
    matriz_dist(i+1) = 0;
end

dist_re = dist_re';

while any(matriz_dist==0) == 1
    k = size(matriz_dist,1);
    i = 1;
    while i<=k
        if matriz_dist(i) == 0
            matriz_dist(i) = [];
        end
        k = size(matriz_dist,1);
        i = i + 1;
    end
end

%% Retirar os zeros das matris das distancias de re

while any(dist_re==0) == 1
    k = size(dist_re,1);
    i = 1;
    while i<=k
        if dist_re(i) == 0

```

```

        dist_re(i) = [];
    end
    k = size(dist_re,1);
    i = i + 1;
end
end

%% Calculo PD e PI das distancias de Ré

for i = 1:2:n_sr*2
    d_re(i) = (dist_re(i)+dist_re(i+1))/2;
end

dist_re = d_re';

% tirar os zeros da matriz
while any(dist_re==0) == 1
    k = size(dist_re,1);
    i = 1;
    while i<=k
        if dist_re(i) == 0
            dist_re(i) = [];
        end
        k = size(dist_re,1);
        i = i + 1;
    end
end
%% SEPARA DIST. DE PD E PI REORGANIZANDO EM UMA NOVA MATRIZ

div=(size(matriz_dist,1))/n_sr;
cont = 1;
for ns = 1:n_sr
    j = 2*n_pts*ns;
    k = j - n_pts;
    for i = (k-n_pts+1):k
        while (cont<=n_pts*n_sr)
            m(cont,1) = matriz_dist(i,1);
            m(cont,2) = matriz_dist(j,1);
            j = j-1;
            cont = cont*1000;
        end
        cont = (cont/1000)+1;
    end
end

%% CALCULO DA MÉDIA DAS DISTANCIAS

dist_v= (m(:,1)+m(:,2))/2;

%% CALCULO DO DESNÍVEL

disp(' ')
K=input('Digite o valor de K: ');
disp(' ')

```

```

R = 6400000;

% Calculo distancias horizontais
for i = 1:n_sr
    DHre(i,1) = dist_re(i)*sin(z_re(i));
end
for i = 1:n_pts*n_sr
    DHva(i,1) = dist_v(i)*sin(z_vante(i));
end

% Calculo auxiliar desnivel de RE e os de VANTE
for i = 1:n_sr
    aux = ((DHre(i)^2)/(2*R)) - ((DHre(i)^2*K)/(2*R));
    RE(i,1) = (dist_re(i)*cos(z_re(i)))+aux;
end

for i = 1:n_pts*n_sr
    aux = ((DHva(i)^2)/(2*R)) - ((DHva(i)^2*K)/(2*R));
    VA(i,1) = (dist_v(i)*cos(z_vante(i)))+aux;
end

% Calculo do desnivel de cada série

g = n_sr;
k = n_pts*n_sr;
aux = 1;
while aux <= n_sr
    k = (k - n_pts);
    while k >= 0
        for i = (k+1):(k+n_pts)
            desnivel(i,1) = VA(i) - RE(g) - 0.0802;
        end
        g = g-1;
        k = k - 1000;
    end
    k = k + 1000;
    aux = aux + 1;
end

% media das séries

d = 0;
for r = 1:n_pts
    so = 0;
    for i = r:n_pts:(n_pts*n_sr)
        den = n_sr;
        if desnivel(i,1) == 0
            den = den - 1;
        end
        so = so + desnivel(i,1);
    end
    DeltaH(r,1) = so/den;
end
DeltaH

```